

L'imagerie solaire facile

Le projet Sol'Ex

Par christian Buil et Valérie Desnoux

Le projet Sol'Ex - The « Solar Explorer »

Un instrument d'observation multi longueurs d'onde de la surface du Soleil

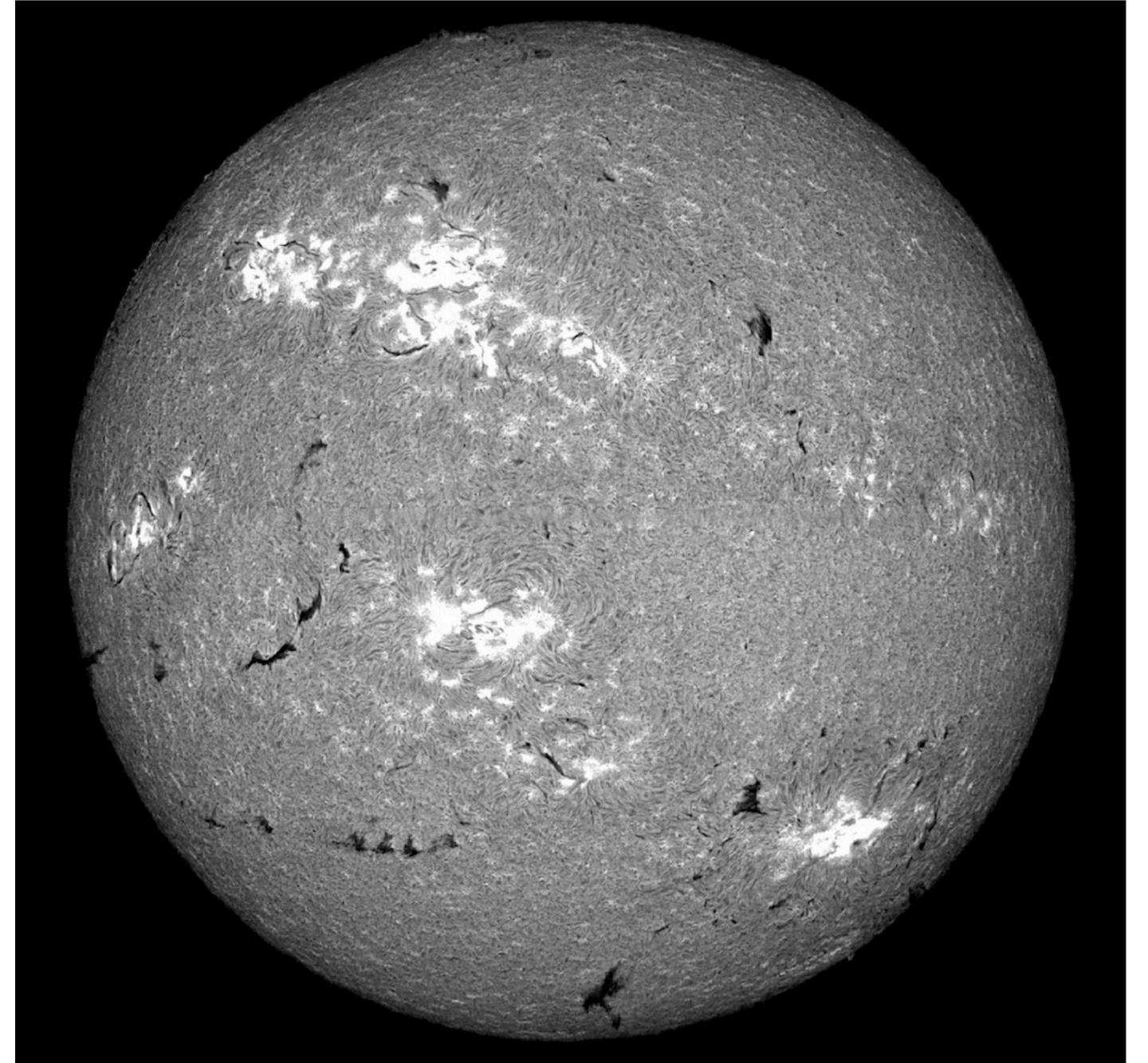
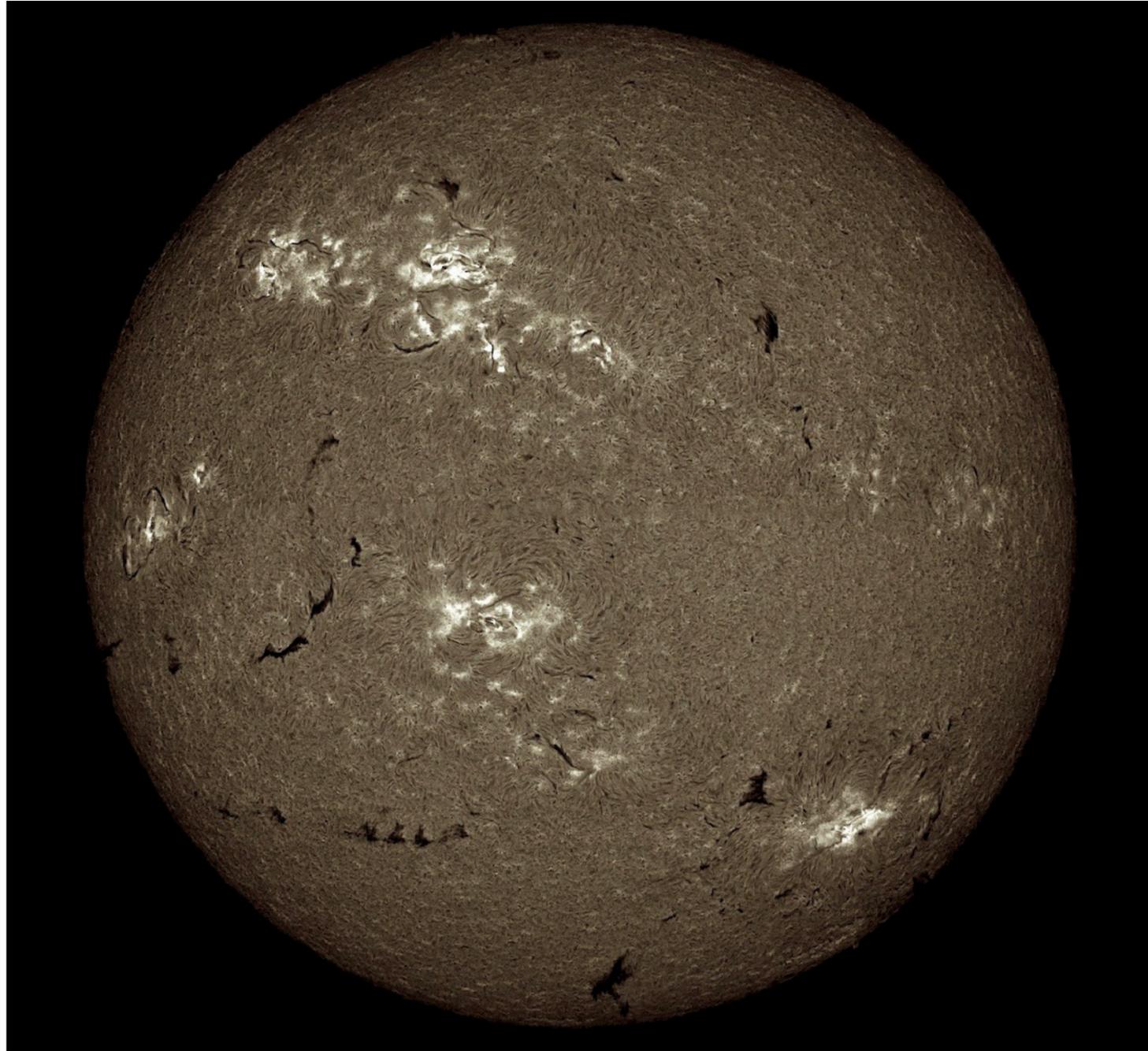


Image H-alpha - 18 mai 2020 - Sol'Ex sur une lunette Sky-Watcher 100ED

The « Solar Explorer »



SOL'Ex

Motivation et philosophie du projet :

- Rendre accessible à la plupart des amateurs la technique de la spectrohéliographie
- Un instrument facile à construire soi-même pour abaisser le coût
- Une expérience pédagogique
- Un prix minimal en adoptant des solutions techniques innovantes, simple et en visant une large diffusion (impression 3D, fourniture d'un kit optique)
- Offrir de bonnes performances (résolution typique de 0,2 Å) tout en permettant une utilisation sur des lunettes/télescopes de petites dimensions (50 à 120 mm de diamètre typique)
- Un logiciel de construction de l'image monochromatique automatique (INTI)
- Une grande flexibilité d'usage et évolution en spectrographe stellaire (Star'Ex...)

Sol'Ex est un spectrohéliographe - Le principe

Balayage du disque sur la fente d'entrée de Sol'Ex et capture à haute cadence des image du spectre (100 à 300 trames/s.).
Durée d'acquisition avec une caméra moderne : 10 to 30 sec. typ.

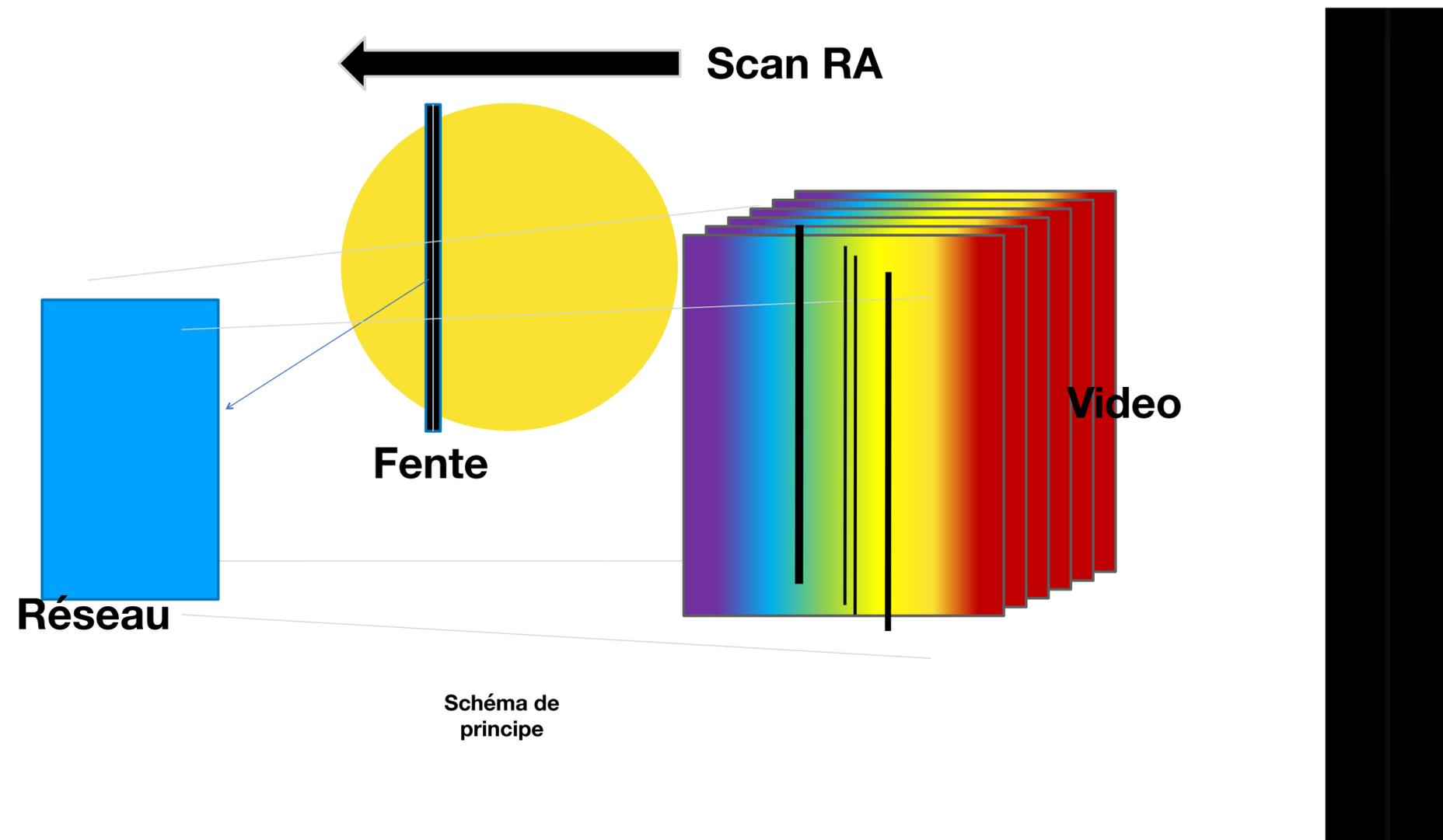
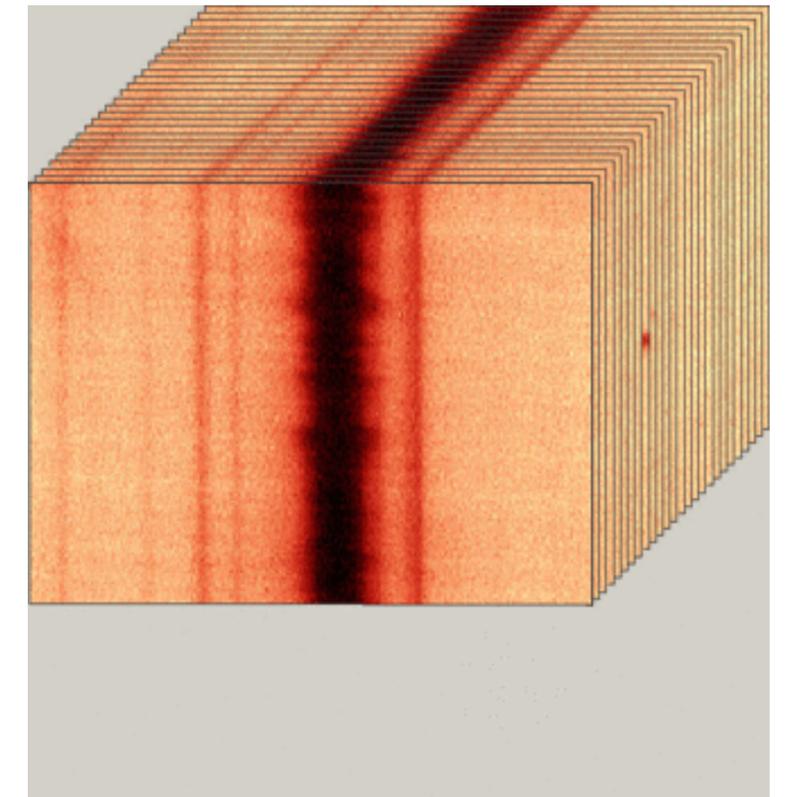


Schéma de principe

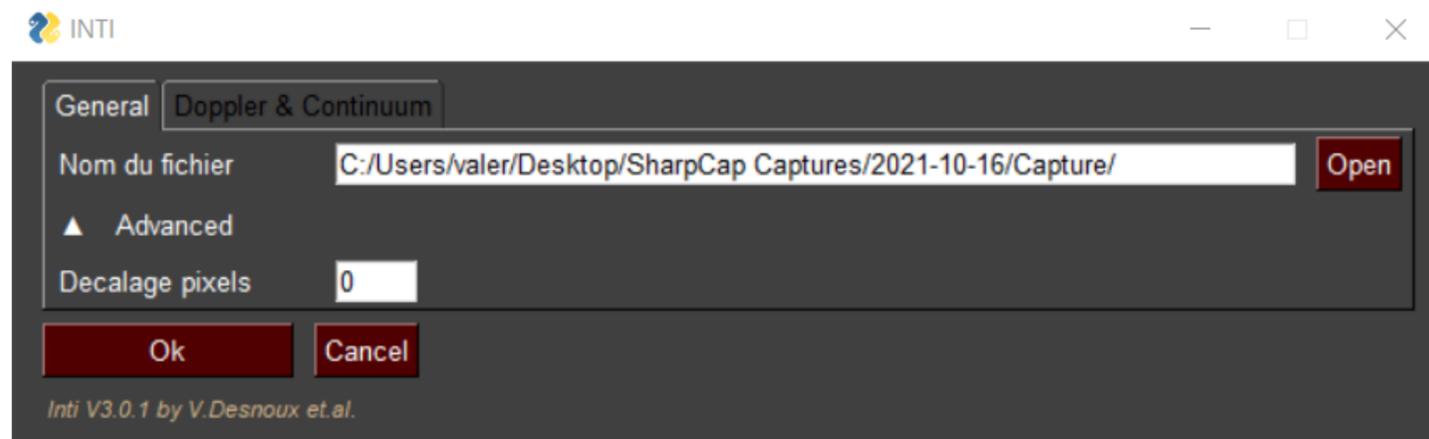
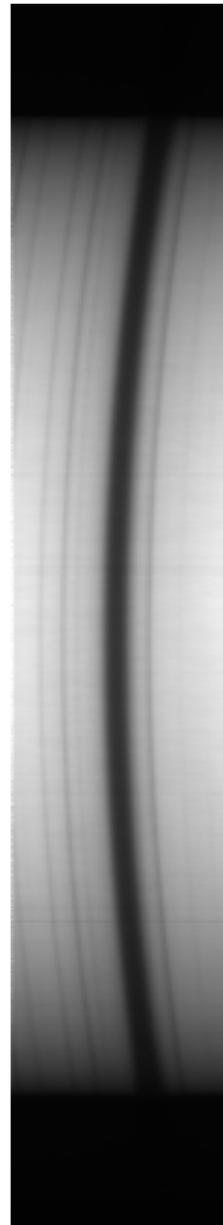


http://www.astrosurf.com/spectrohelio/shg_video.php

Philippe ROUSSEL

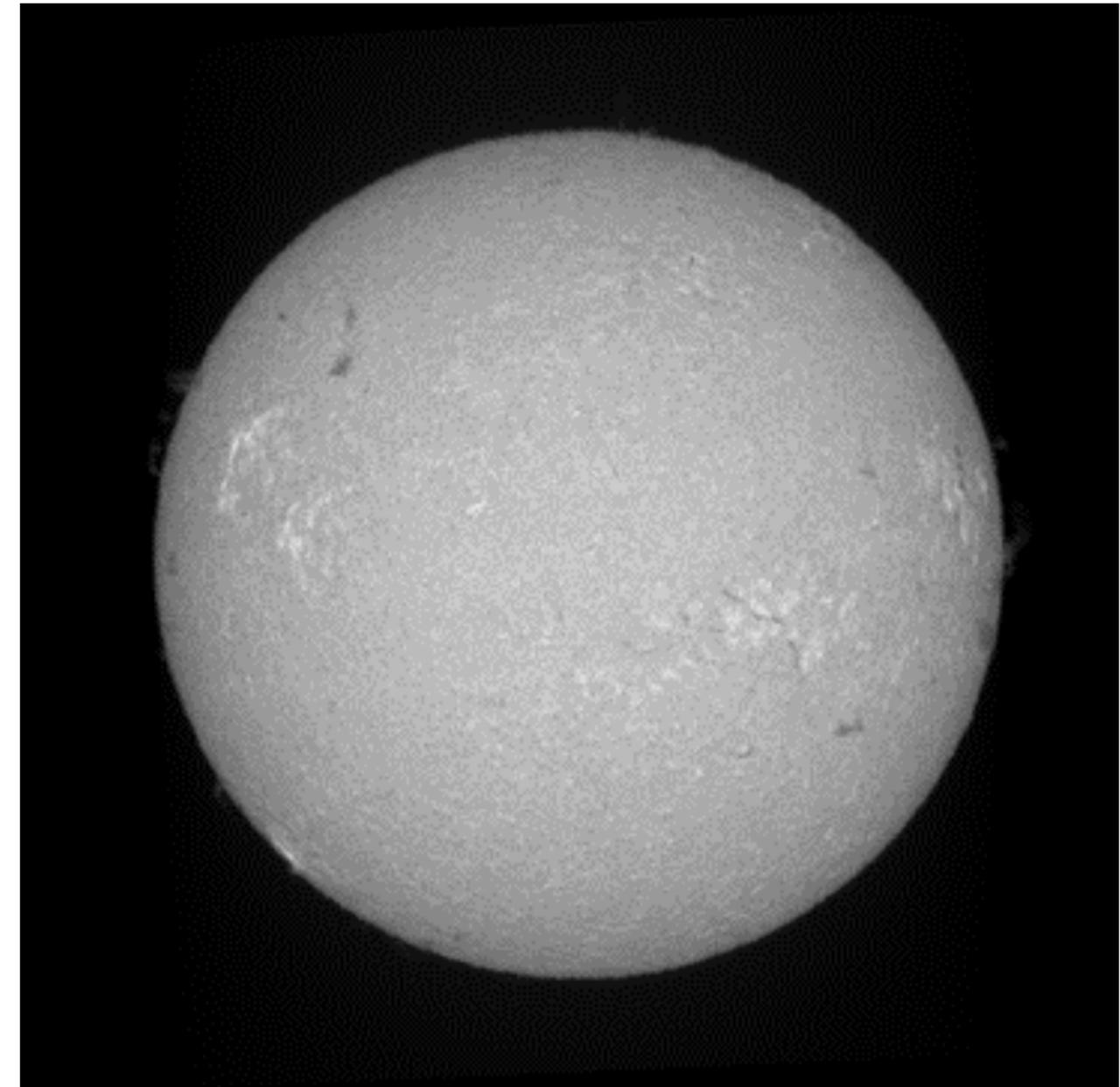
Traitement des balayages solaires (scans) avec INTI

Une application Python OpenSource (V. Desnoux & all)



Un Click
Construction de l'image automatique

<http://valerie.desnoux.free.fr/inti/>





Acer (C) Ce PC Explorateur

Visual Spec codepy OHP astro 2020 Be newsletter

Google Chrome SharpCap 4.0 AstroSurface

Capture 72ED mai 22 Documents Images ccd

Visual Spec AutoStakkert Chicken

2022-10-14 - Makes spec_mdi 2020-07-20 Neowise SharpCap Captures

TeamViewer Stellarium Iris

Solex_ser_recon solex

Photoshop Notepad++ OpenSCAD

PRISM v11 INTI RCE_Imagerie_S...

llereunion

Photomatix Pro 6.2 inti_register

Adobe Premiere inti_selector

OBS Studio FireCapture.

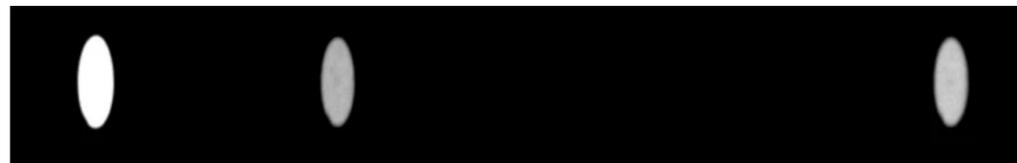
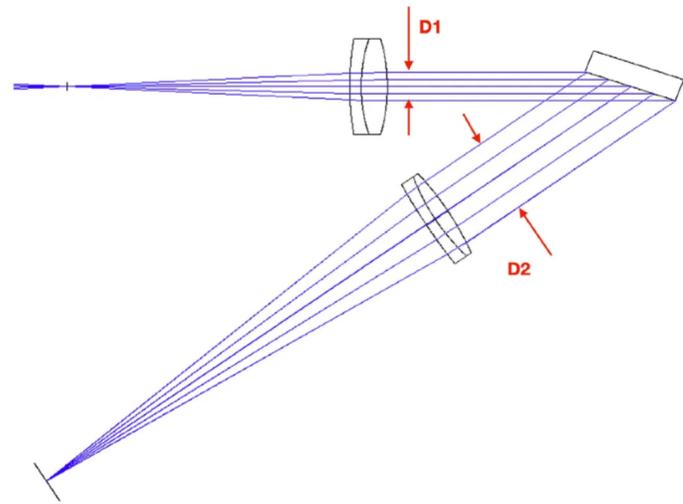
hugin FileZilla Client

Corbeille

Le schéma optique : dans le détail

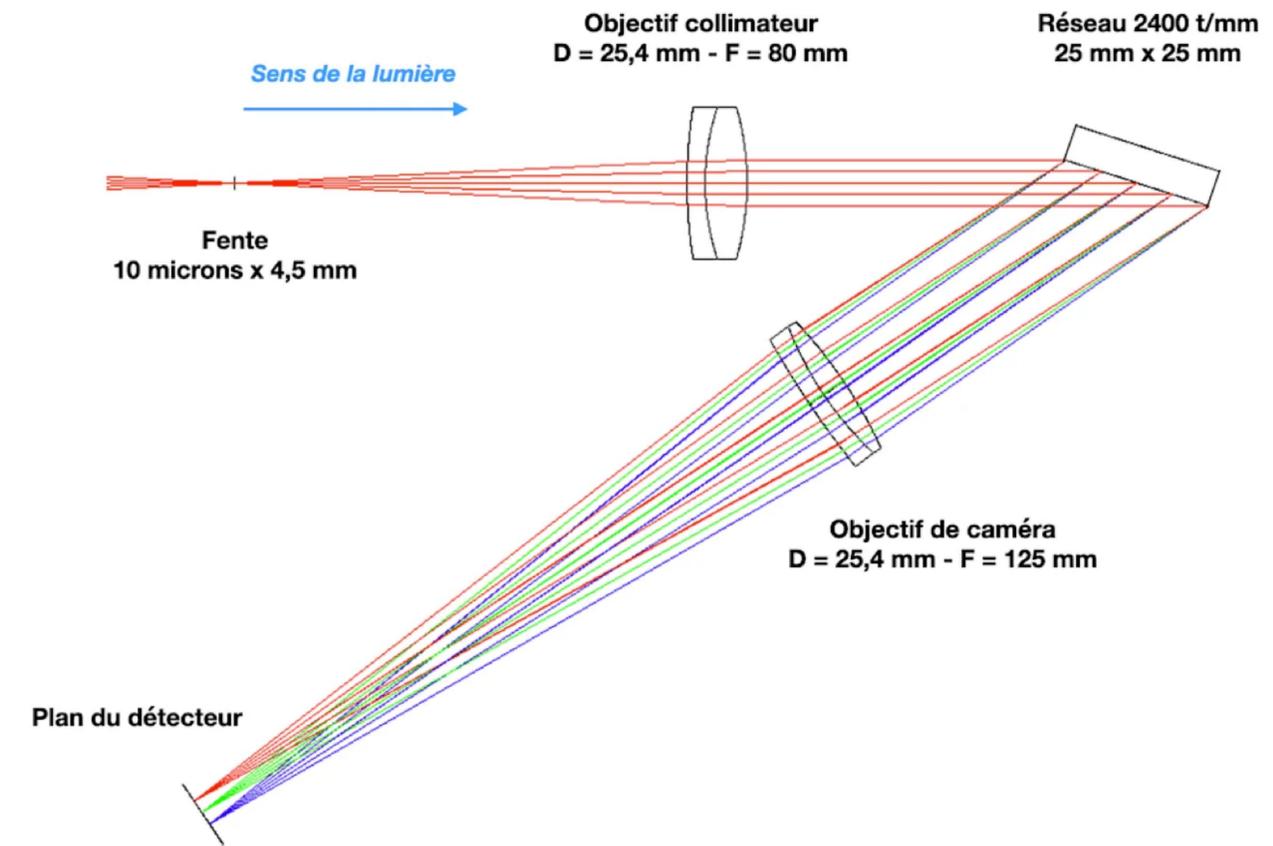
Une configuration optique très classique, mais :

- Ajustement fin des paramètres relativement à la petite taille des pixels des caméras CMOS populaires (ASI178MM, ASI290MM, ...) + valorisation haute-cadence de lecture (250 fps typ.)
- Utilisation d'un réseau holographique à haute dispersion spectrale (2400 traits par millimètre)
- Objectifs spécialement conçus pour le projet (chromatisme réduit par l'emploi d'un verre spécial)
- Exploitation d'une fente très régulière sur un support en verre (10 microns de large)
- Exploitation du principe de l'anamorphose pour accroître la résolution spectrale :



$D1 / D2 = 0.383$ au niveau de H-alpha -> facteur d'anamorphose -> réduction de la largeur de l'image de la fente sur le détecteur -> augmentation du pouvoir de résolution

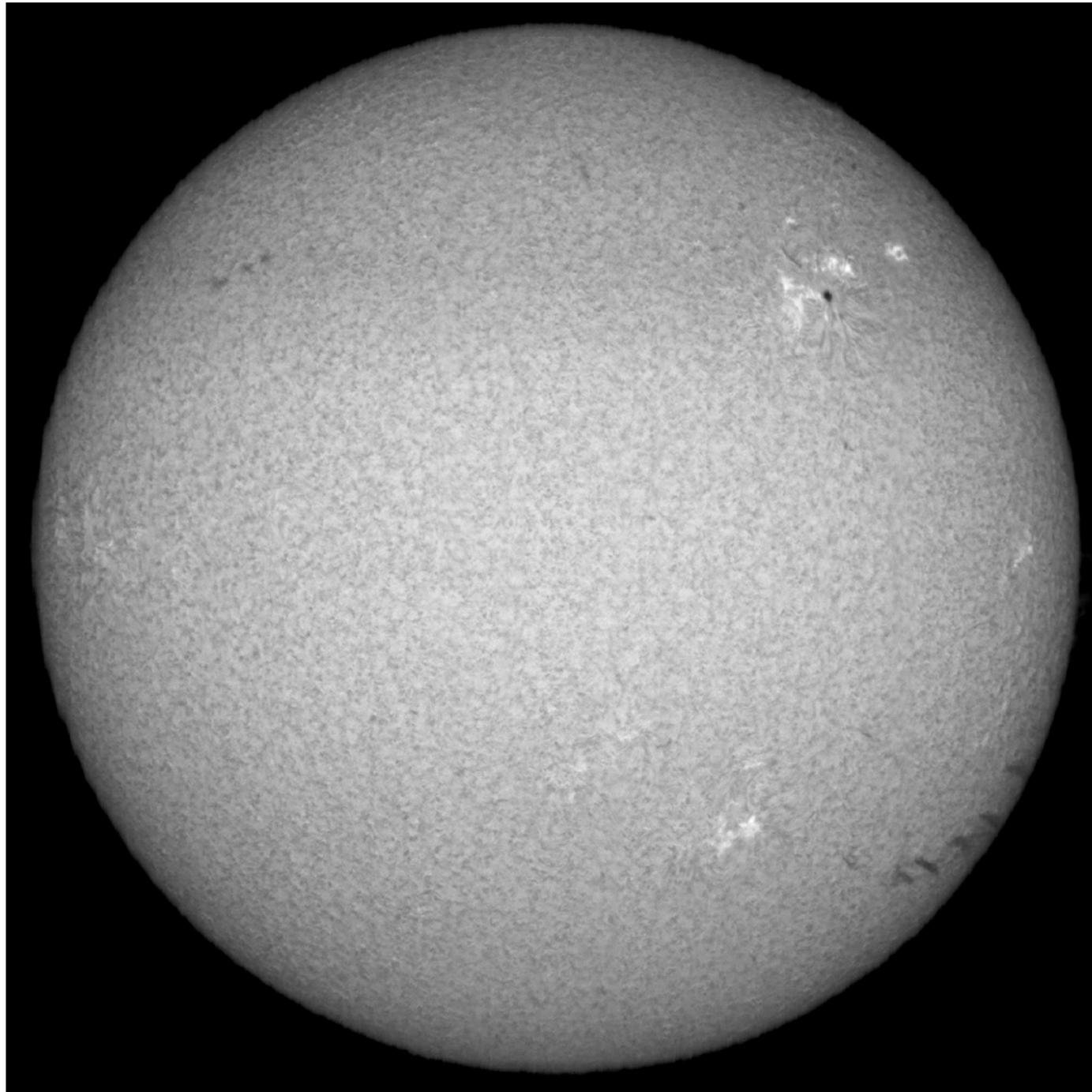
Sol'Ex est un spectrographe à très haute résolution spectrale : $R = \lambda/\Delta\lambda = 40.000$ -> finesse (bande-passante) de **0,16 Å (0,016 nm)** au niveau de H-alpha + profil gaussien (plus sélectif que le Lorentzien d'un Fabry-Pérot)



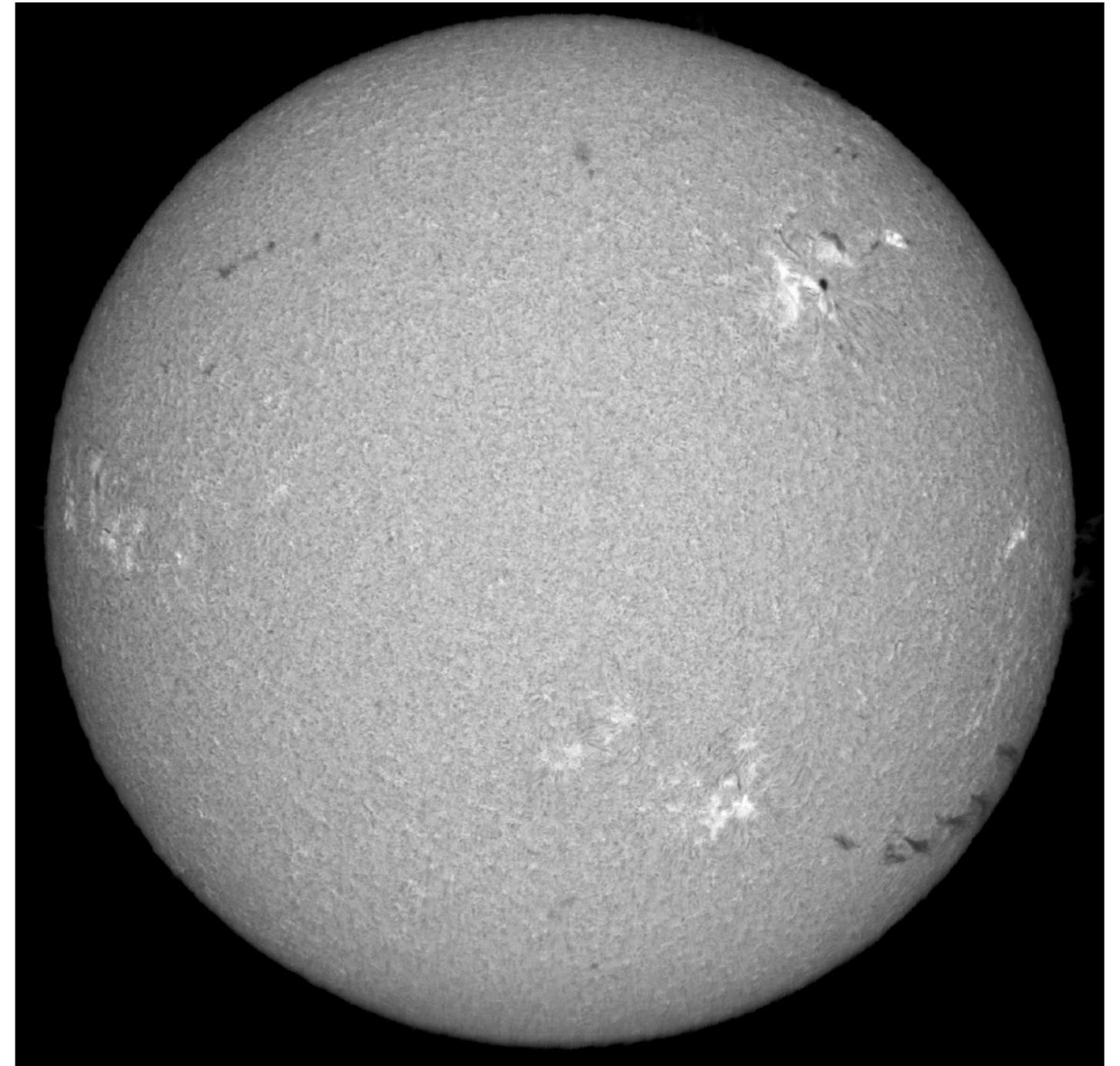
Images
« monochromatiques »
à haut contraste

L'impact de la finesse spectrale : le contraste des images de la chromosphère

2.5-inch refractor f/6.5



Sol'Ex : grating 1200 lines/mm - $\Delta\lambda = 0,78 \text{ \AA}$



Sol'Ex : grating 2400 lines/mm - $\Delta\lambda = 0,16 \text{ \AA}$

Forces et faiblesses de Sol'Ex

Les forces

Finesse spectre élevée : 0,2 Å - 0,3 Å (H-alpha)
(contraste des images, exploration du profil des raies, Doppler, champ magnétique...)

Capacité de sélectionner la longueur d'onde d'observation (H-alpha, H-beta, Helium, Magnésium, calcium, continuum...)

Instrument très léger (200 grammes sans caméra) et compact facile à installer sur une petite lunette (50 mm - 120 mm)

Possibilité de construire l'instrument soi-même et de l'adapter : rassurant et expérience pédagogique

Robustesse : pas de détérioration dans le temps

Faible coût : moins de 800 euros (hors caméra)

Les faiblesses

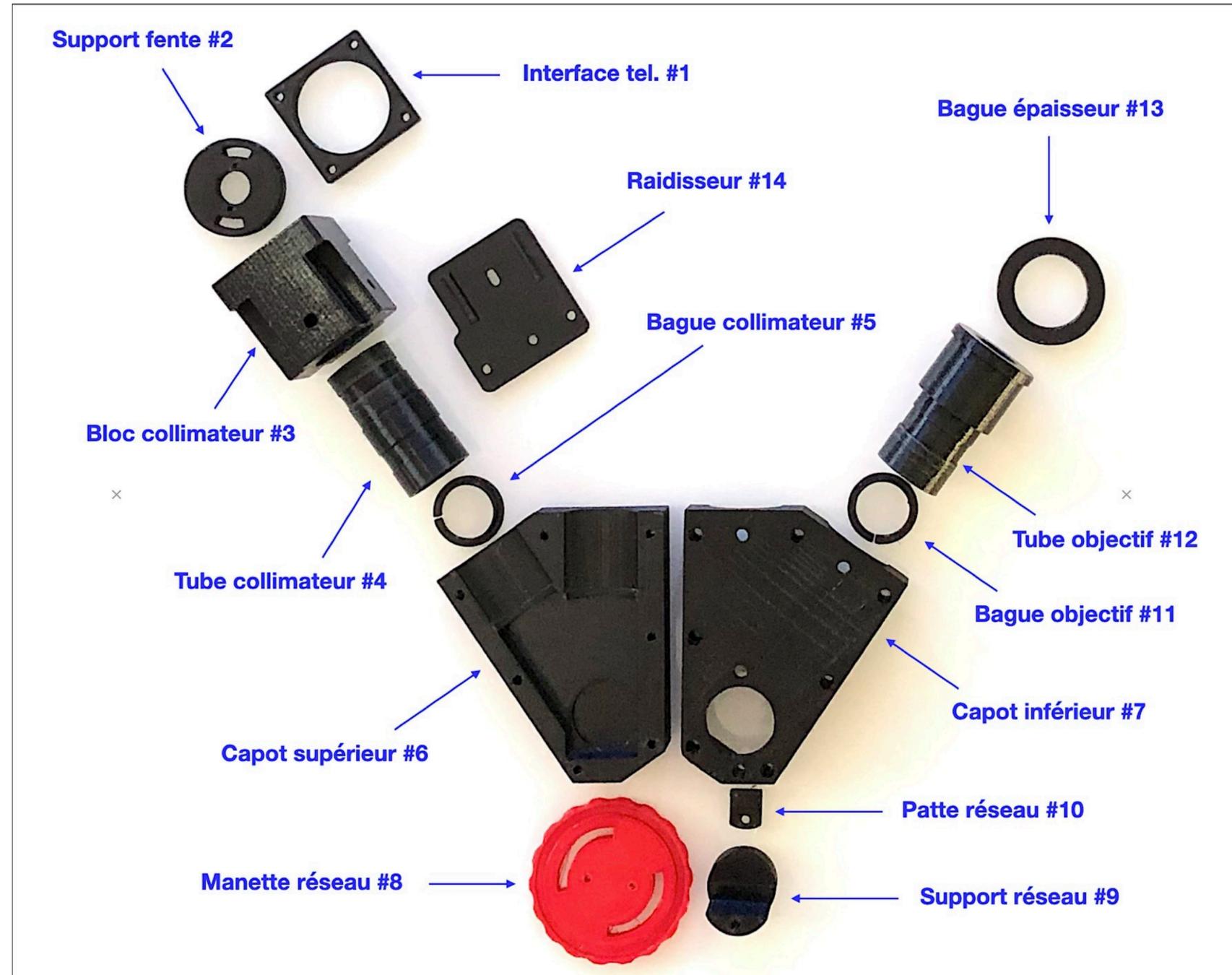
Le concept instrumental peut faire peur et n'a pas bonne presse (complexité, poids...) - mais plusieurs centaines d'utilisateurs se sont déjà lancés sans compétence a priori

La prise de vue n'est pas instantanée mais séquentielle (durée de 10 à 20 secondes) - mais au bout de ce temps, l'image est quasi directement exploitable (contraste, homogénéité...)

Traitement difficile (exploitation d'un lourd fichier SER, corrections géométrique) - mais gros effort sur le volet logiciel : traitement transparent, rapide et en un click !

Sensibilité à la turbulence. Sélection d'image moins efficace qu'en imagerie snapshot - compositage encore possible (stacking), mais moins massif qu'avec un filtre

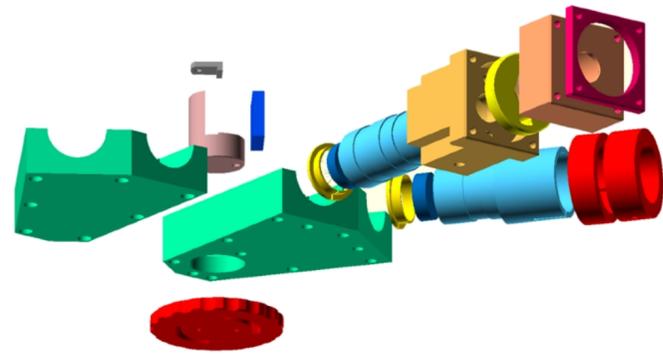
La fabrication



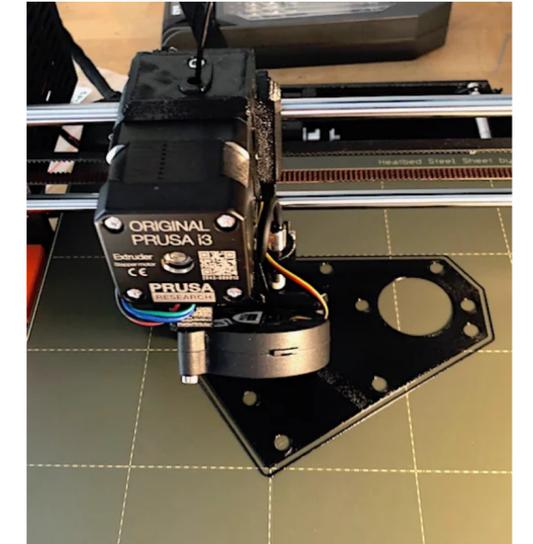
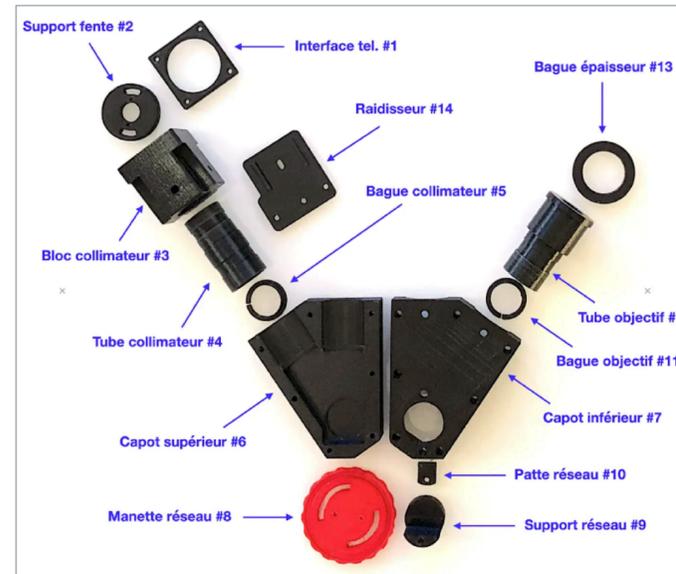
Impression 3D et kit optique

Un site web décrit tous les détails de la construction et de l'utilisation : <http://www.astrosurf.com/solex/>

De nombreuses vidéos sont disponibles pour vous guider... et une large communauté peu vous aider (listes, forum, Facebook...)



Nombre limité de pièces et formes simples

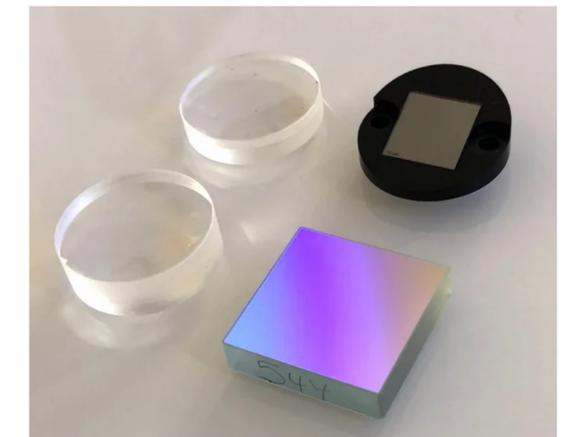


Pour ceux d'entre-vous non familier avec l'impression 3D, certaines entreprises peuvent faire le travail pour vous. Exemple : Azur3Dprint <https://www.azur3dprint.fr/accueil> (178 euros TTC pour un ensemble mécanique totalement monté + l'extension Sol'Ex+ quelques surprises..., 120 euros TTC en pièces détachées)

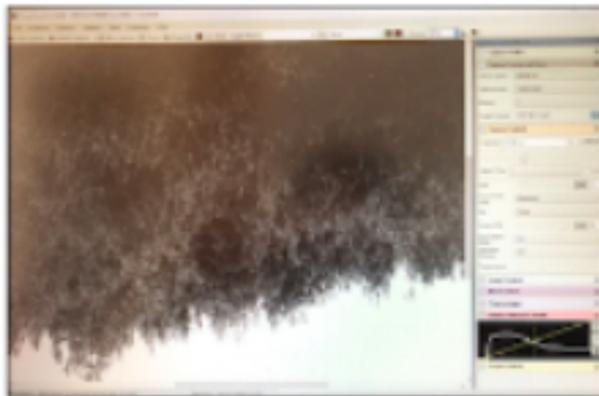


Un kit optique est disponible auprès de Shelyak : <https://www.shelyak.com/?lang=en>

Il comporte un réseau holographique de 2400 lignes/mm, deux objectifs principaux spécialement calculés pour Sol'Ex/Star'Ex/, une fente de 10 microns de large et de 4,5 mm de long haute qualité sur verre, d'autres kits sont disponibles pour star'Ex

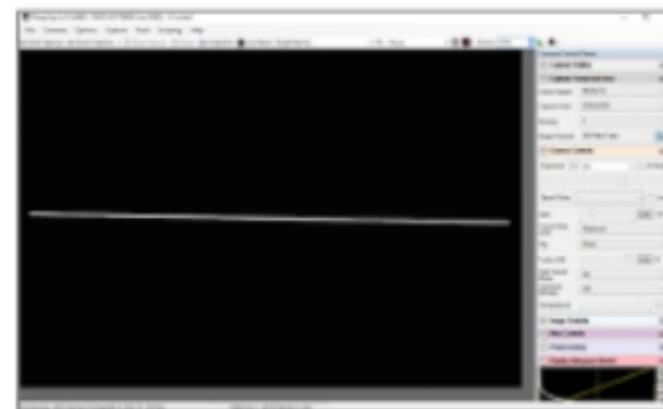


Des réglages optiques sur table simples



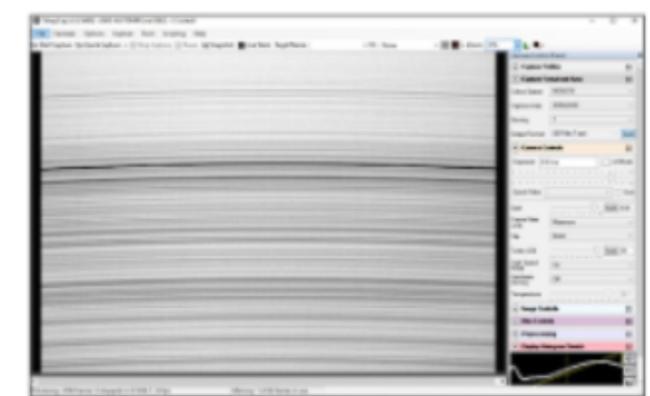
Réglage de la lentille de la caméra à l'infini sur un paysage

1



Focalisation du bloc de la lentille collimateur sur la fente à l'ordre zéro et orientation de la fente

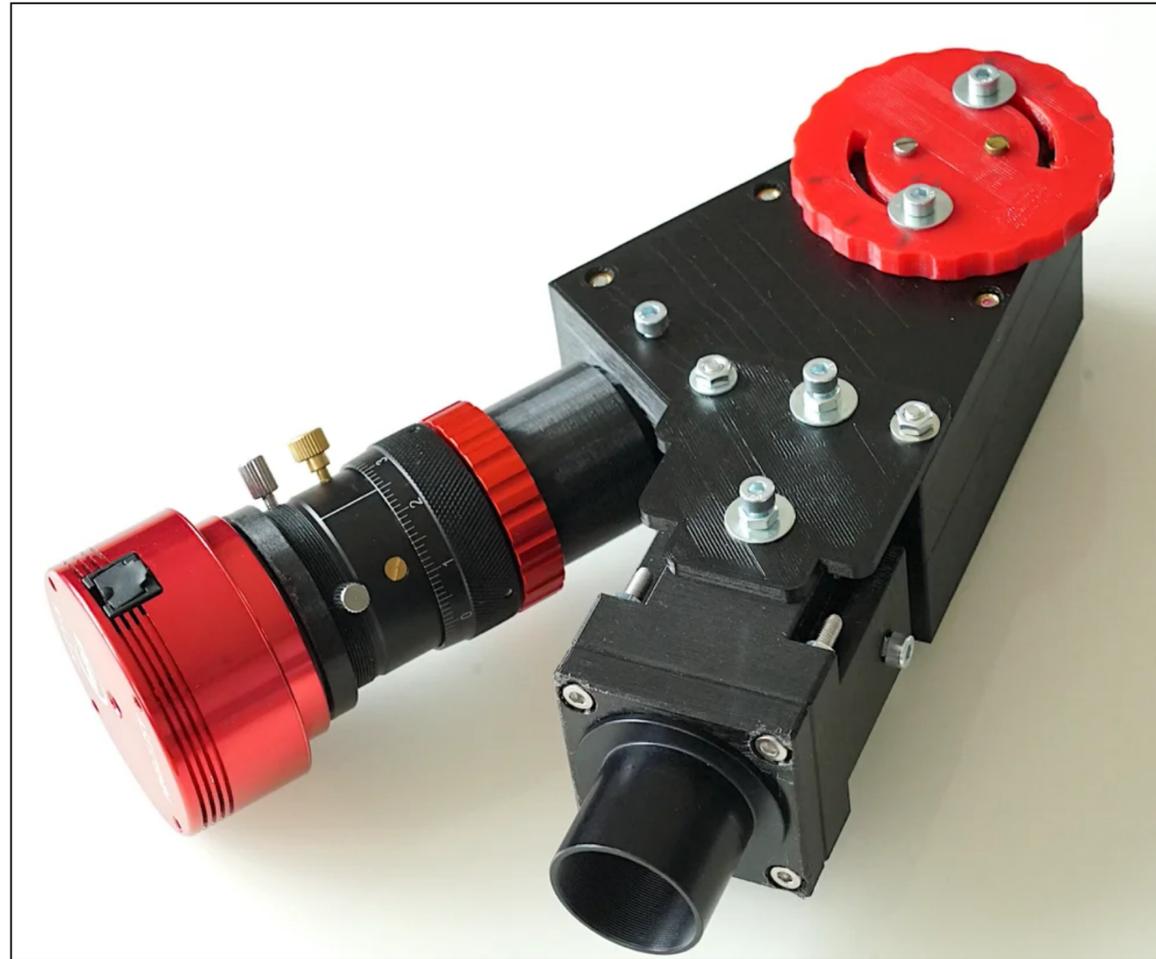
2



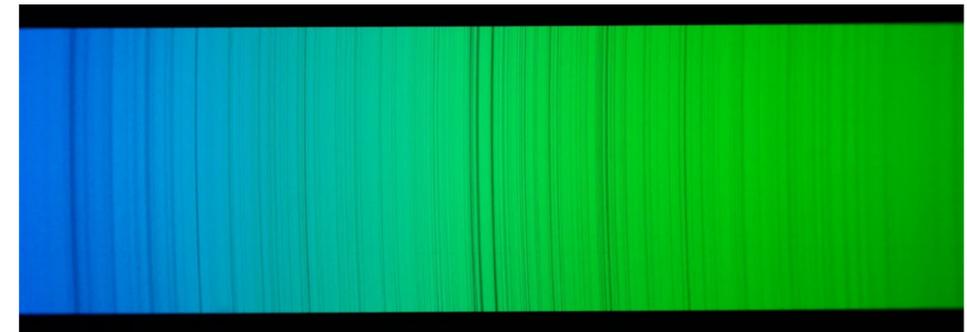
Orientation de la caméra pour avoir l'axe de dispersion bien vertical

3

Le résultat final



Configuration typique pour l'observation solaire



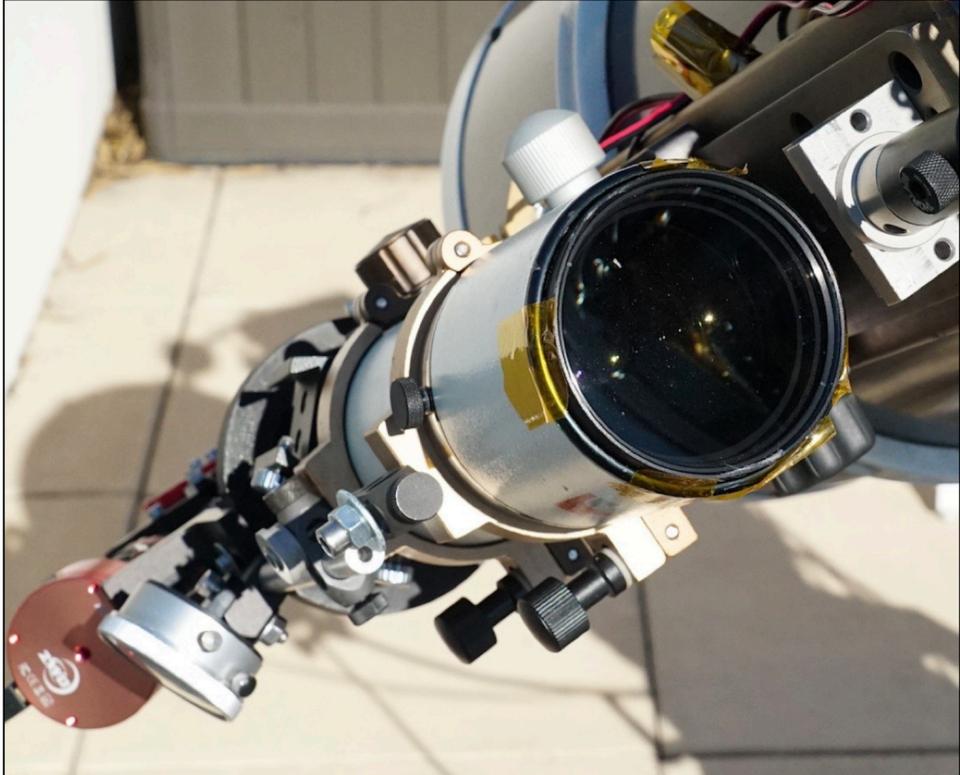
Utilisation d'un appareil photo numérique (pour un projet éducatif, par exemple).

Poids sans la caméra : 200 grammes

Sol'Ex en action : atténuation du flux avec une filtre neutre photographique/cinéma



Sur modèle TS, D = 65 mm - F = 450 mm - Noter l'usage d'un micromètre de mécanicien pour faciliter la focalisation.



Atténuation du flux pleine pupille par des filtres neutres de taille modérée (82 mm)

Choix de l'atténuation : 8 à 16x typiquement

Sol'Ex en action : atténuation du flux avec un hélioscope d'Herschel



Utilisation d'un hélioscope pour l'atténuation du flux solaire



Plusieurs modèles utilisables
(mais attention à la polarisation)

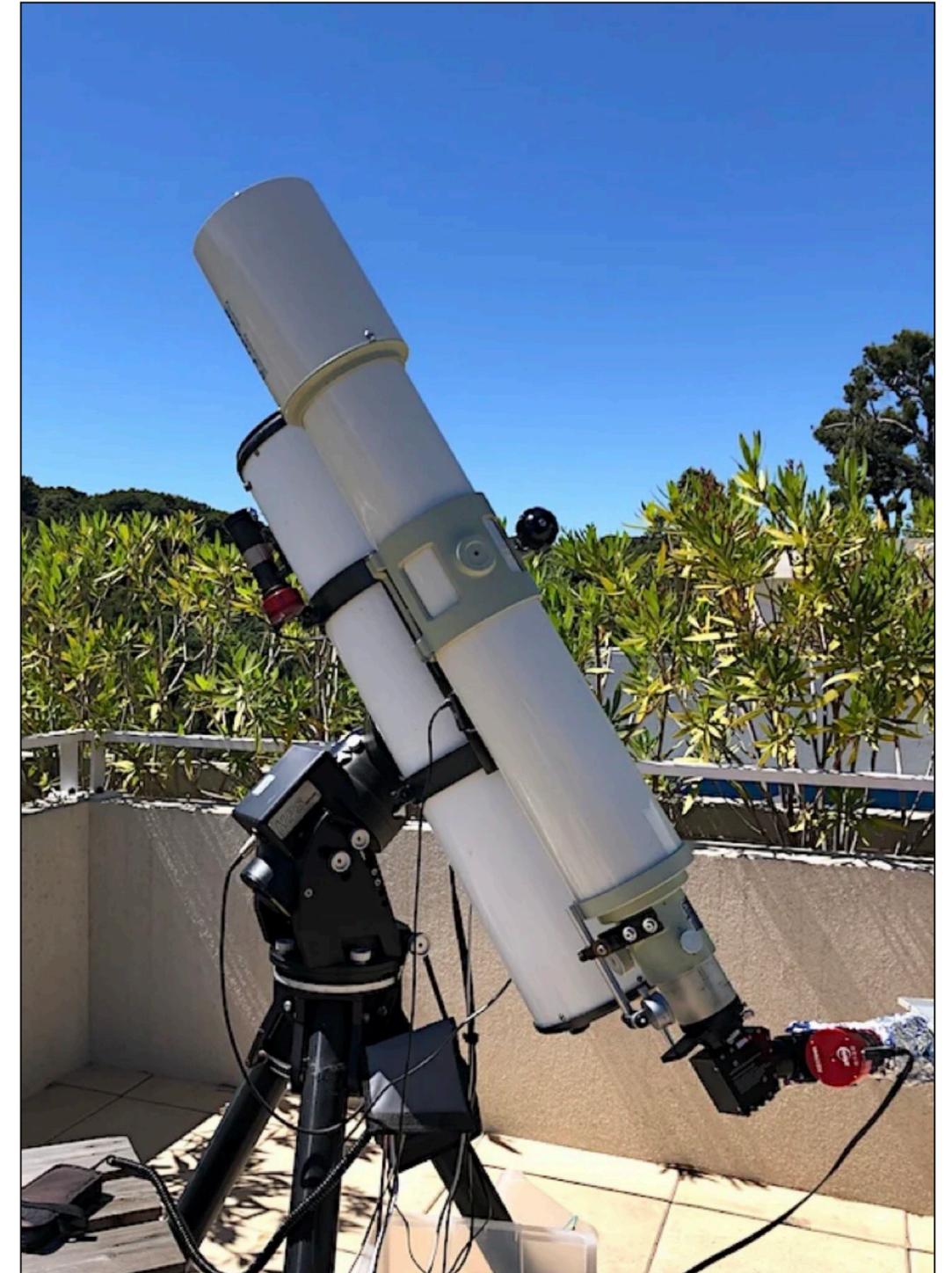
Sol'Ex en action : choix de l'instrument de prise de vue



Avec un petit EVOGUIDE de 50 mm

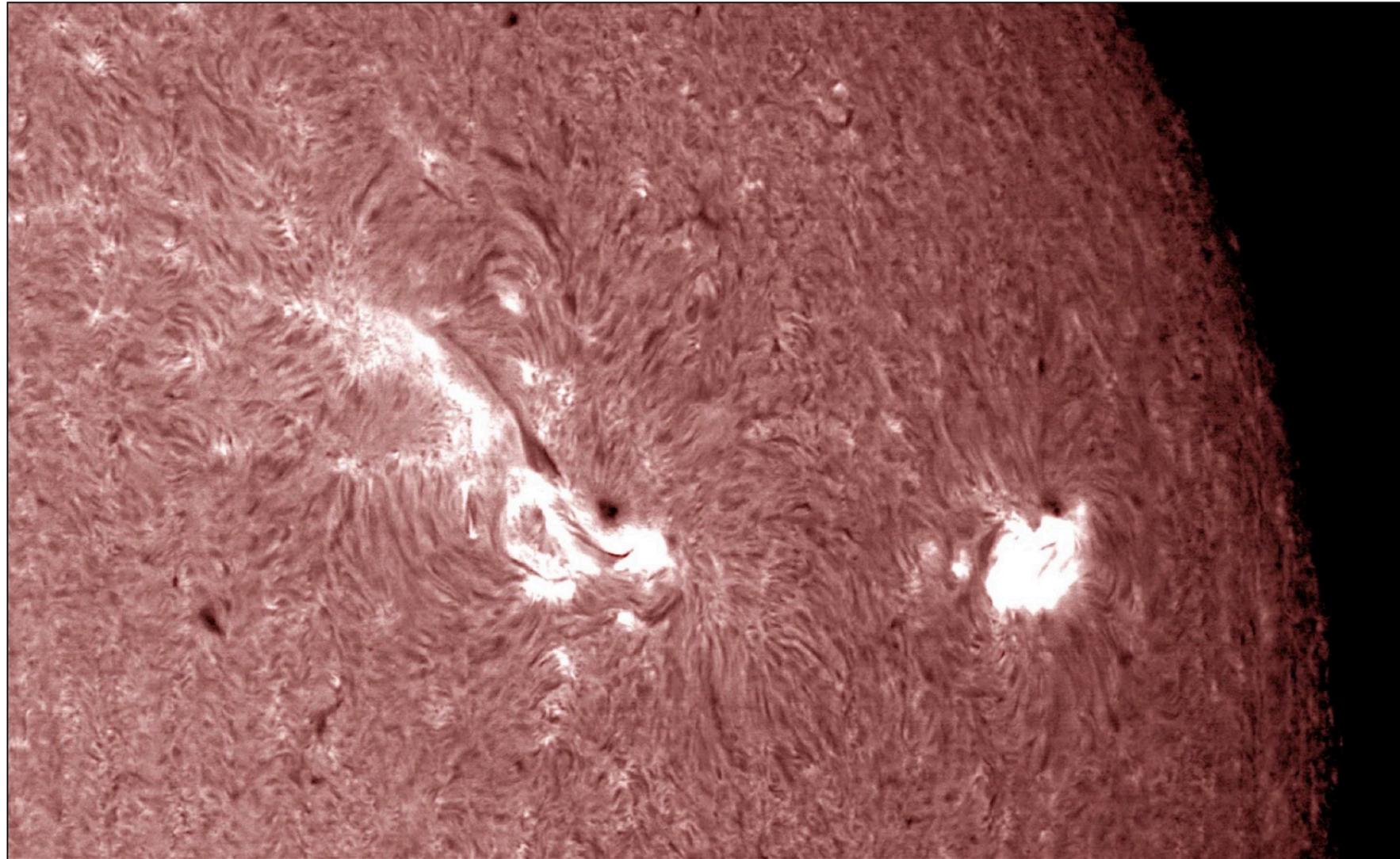


Avec un téléobjectif photographique (Canon 400 mm + 2X extender)

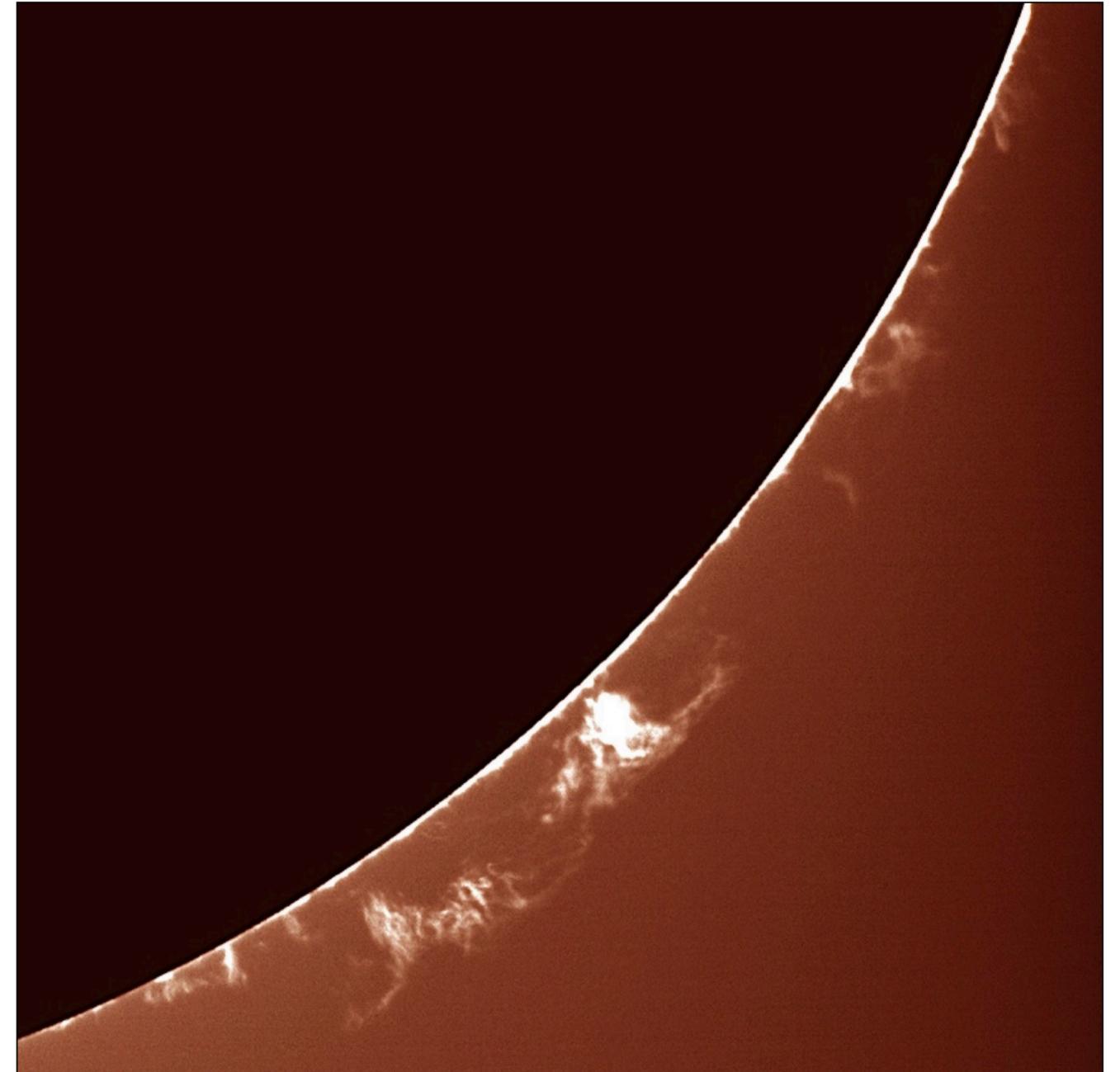


Avec une lunette Takahashi FS128

Longue focale = plus de détails



Détails H-alpha avec une lunette FS128 (F = 1040 mm)



Sol'Ex en action : tout est possible ! (1/2)

Sol'Ex sur un télescope Maksutov ACUTER
D = 60 mm, F= 750 mm (F/D = 12.5) - Prix : 110 euros (!)
(poids : 450 grammes)

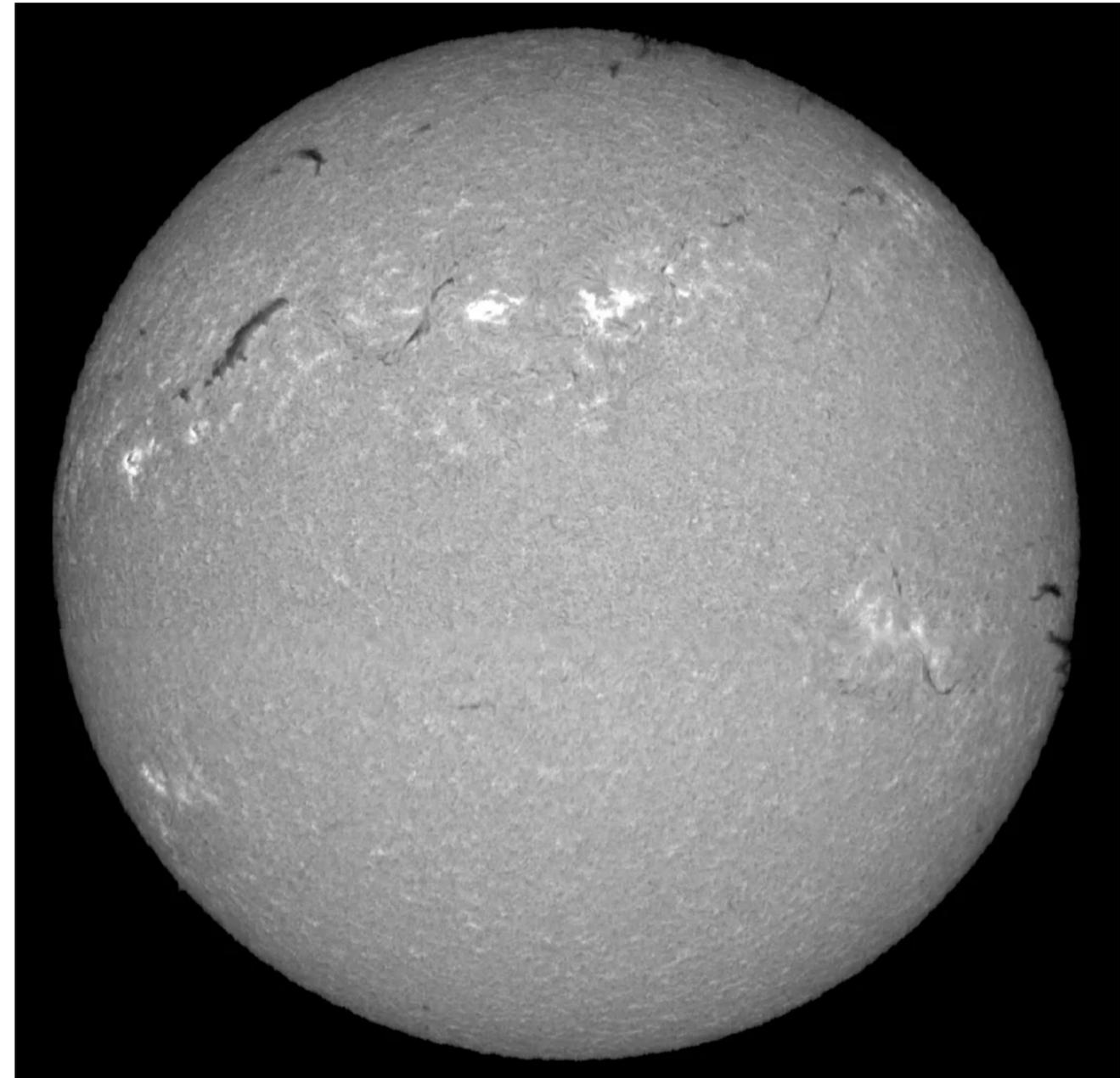


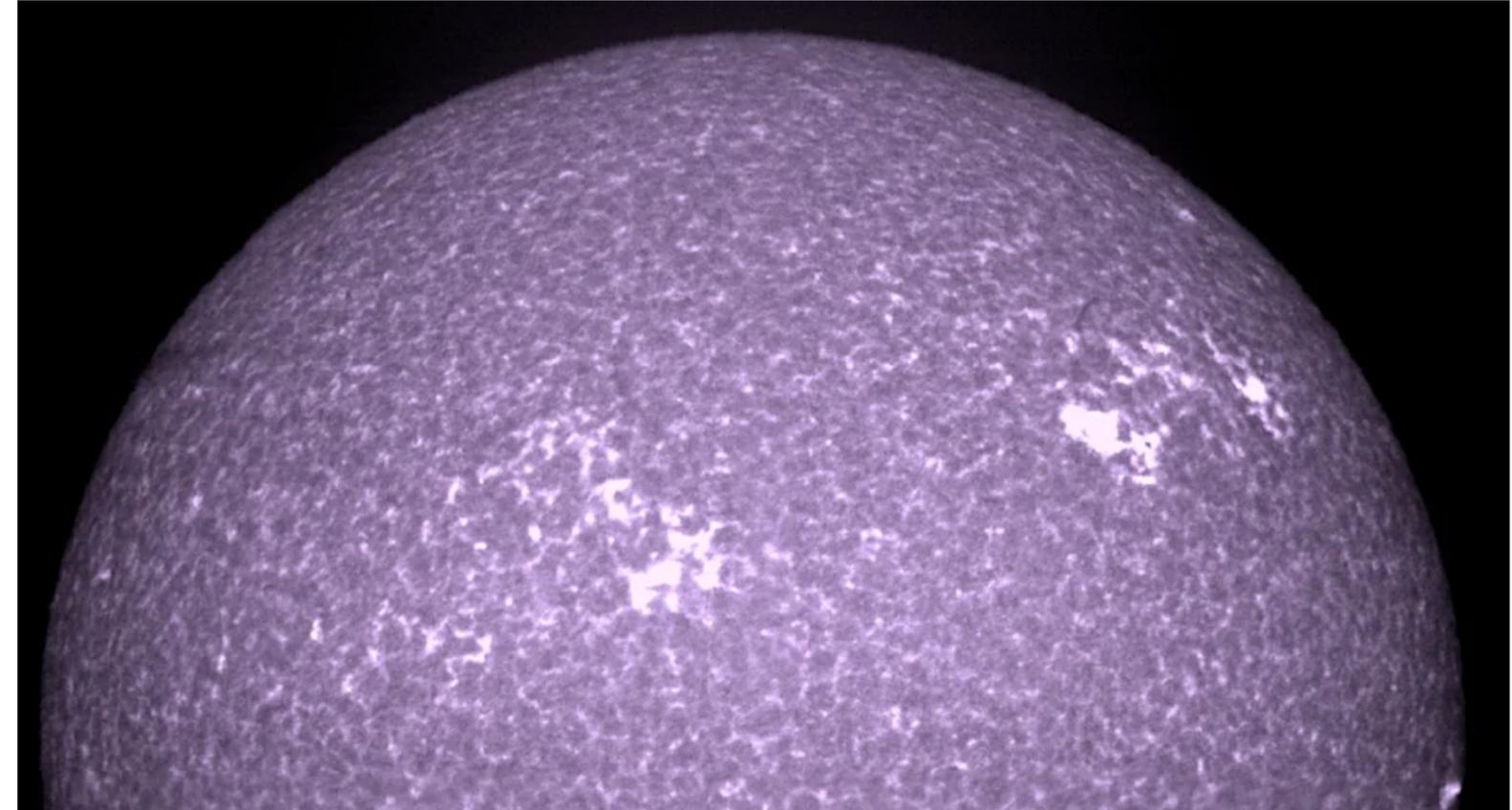
Image du 26 novembre 2021 dans la raie H-alpha avec un tube optique MaksyGO Acuter + filtre ND4

Sol'Ex en action : tout est possible ! (2/2)

Image sur ACUTER de 60 mm - Configuration Maksutov : quasi achromatique et très faible sphérochromatisme dans l'UV (Ca II)



3 décembre 2021 - H α



3 décembre 2021 - Ca II K
(très faible sphérochromatisme dans l'UV)



Grande souplesse offerte par la 3D - interface dédiée + porte filtre :

Limitation du champ image

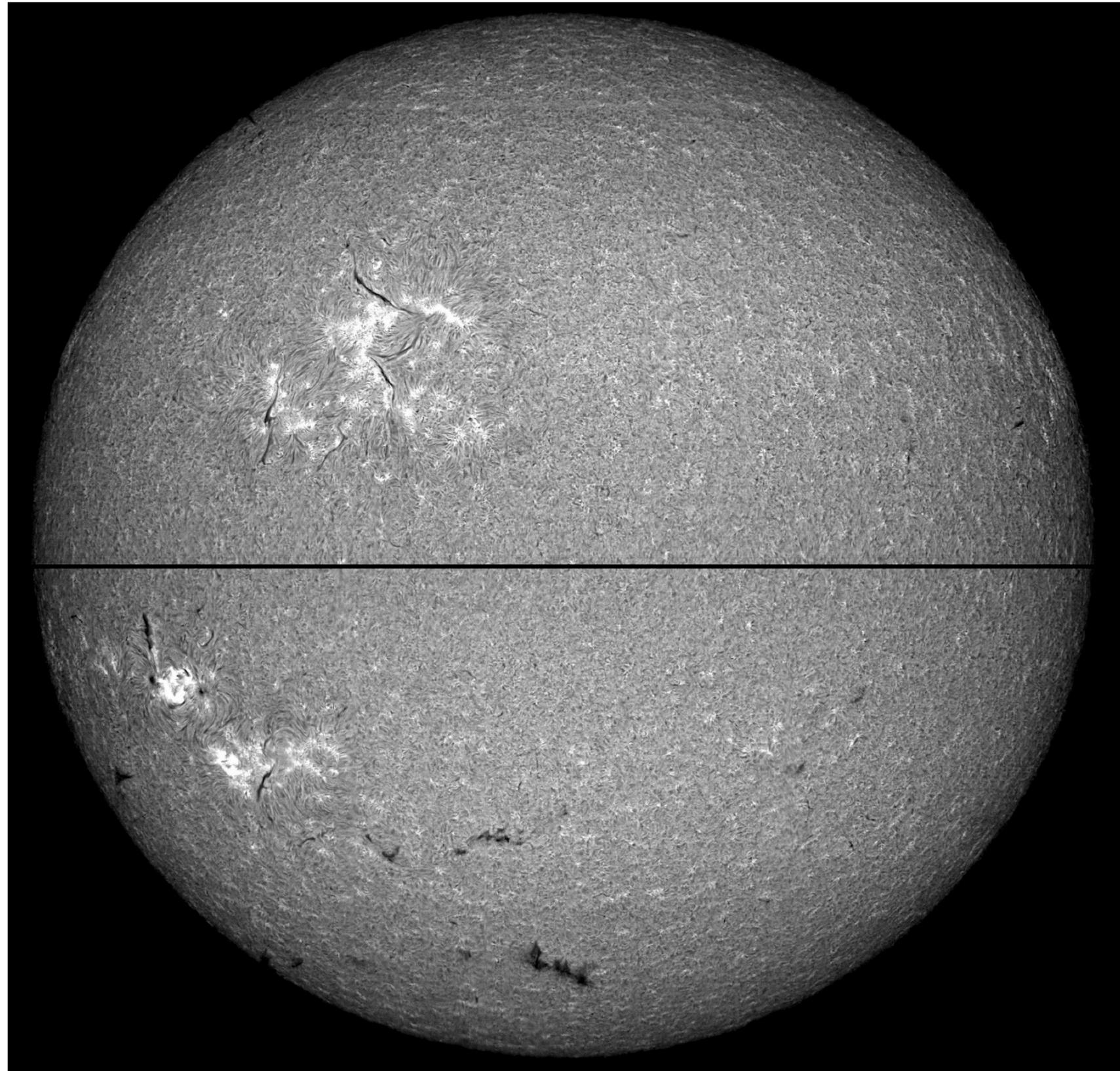
Longueur de la fente d'entrée de Sol'EX = 4.5 mm

Hypothèse : lunette de focale 480 mm

Diamètre angulaire du Soleil en hiver : 0.5421°
Taille du disque au foyer = 4,54 mm

Diamètre angulaire du Soleil en été : 0.5243°
Taille du disque au foyer = 4,39 mm

Lunette FS128 (F=1040 mm)
Mosaïque en 2 partie (2 scans)
27 juin 2021



L'acquisition sur le terrain

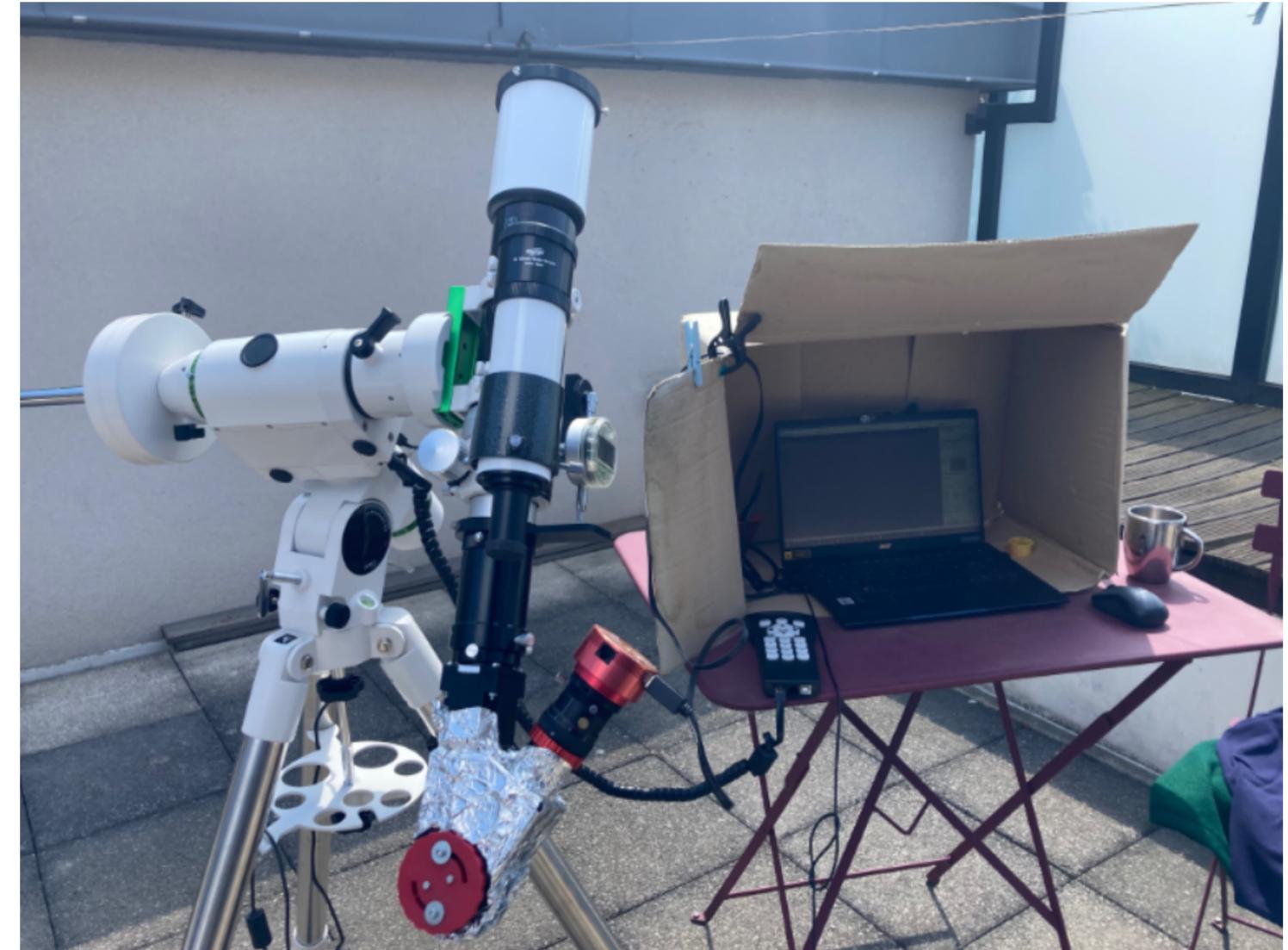
Caméra d'acquisition rapide CMOS (monochrome) :
ASI178MM (idéal), ASI290MM, ASI174MM (ou équivalent QHY...)

Focuser helicoïdal très pratique (ZWO, ...)

Logiciel d'acquisition de fichiers SER (en 16 bits) :
SharpCap, FireCapture...

PC équipé USB3

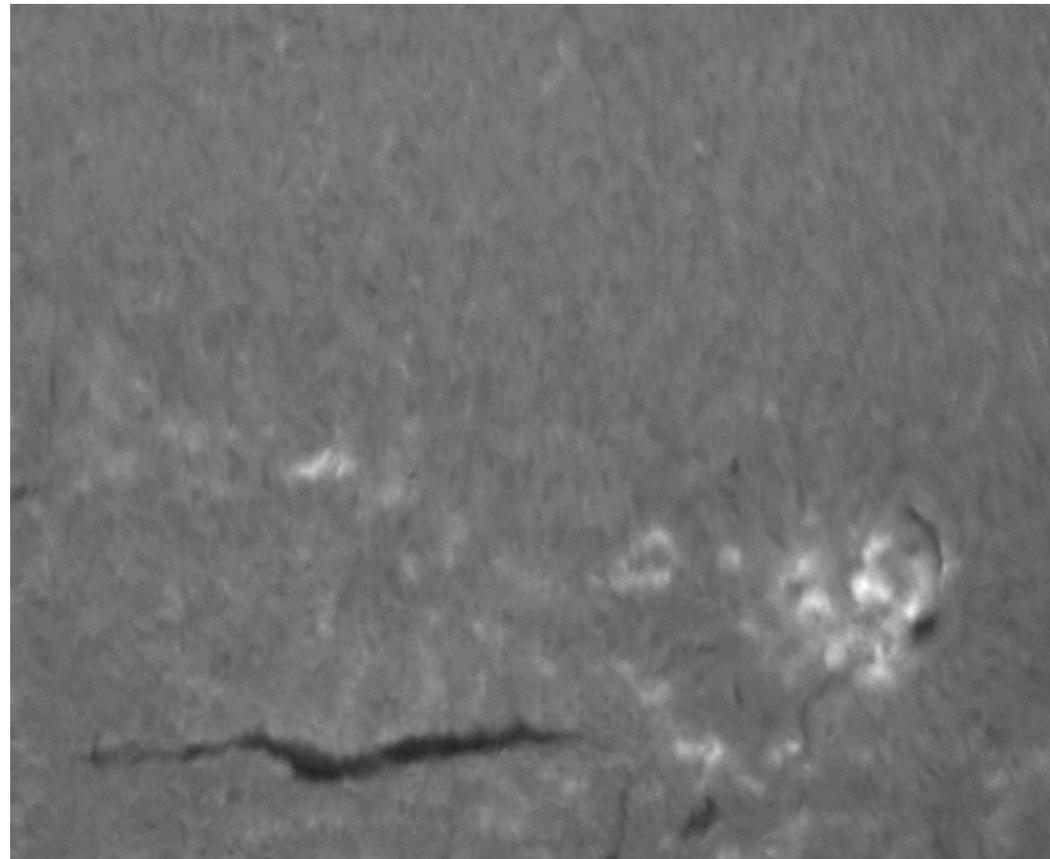
Fenêtrage (horizontal) obligatoire pour tenir la « fps »



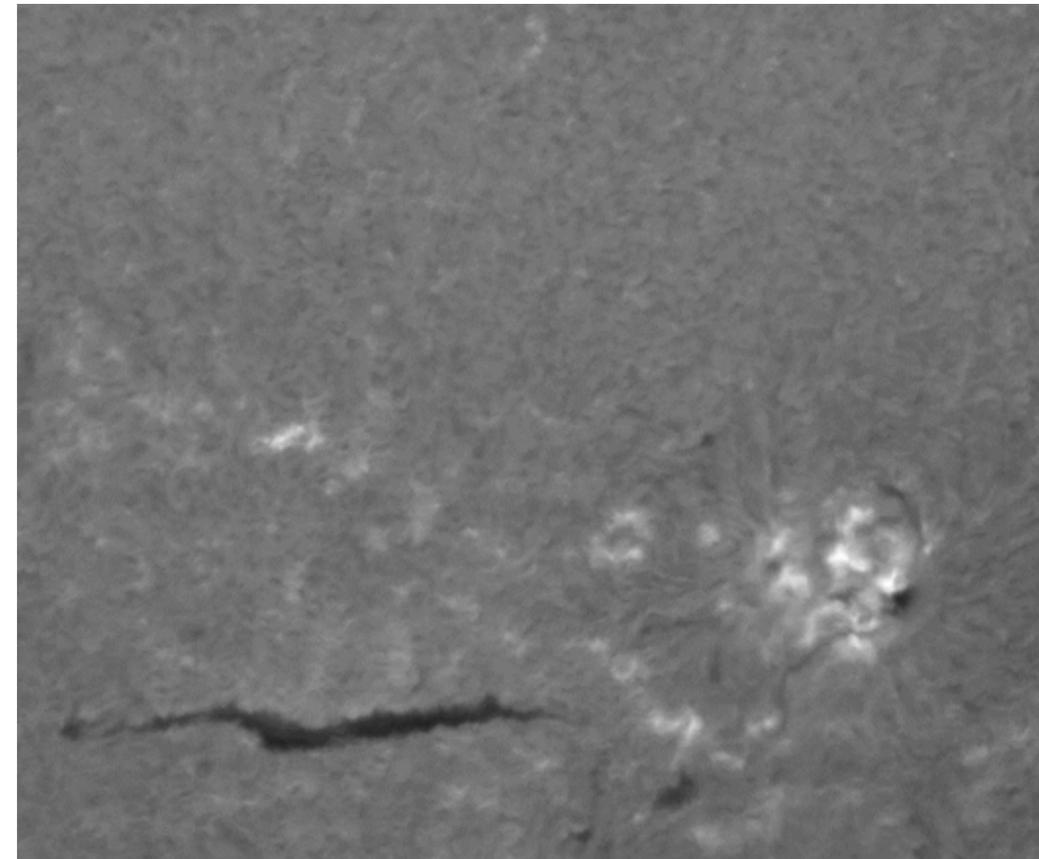
Apprendre à bien focaliser l'image du disque sur la fente

La focalisation

La focalisation de l'instrument est faite en observant les bords du soleil et la finesse du foumillement lors d'un scan de test



La focalisation peut être améliorée



Optimum

La turbulence

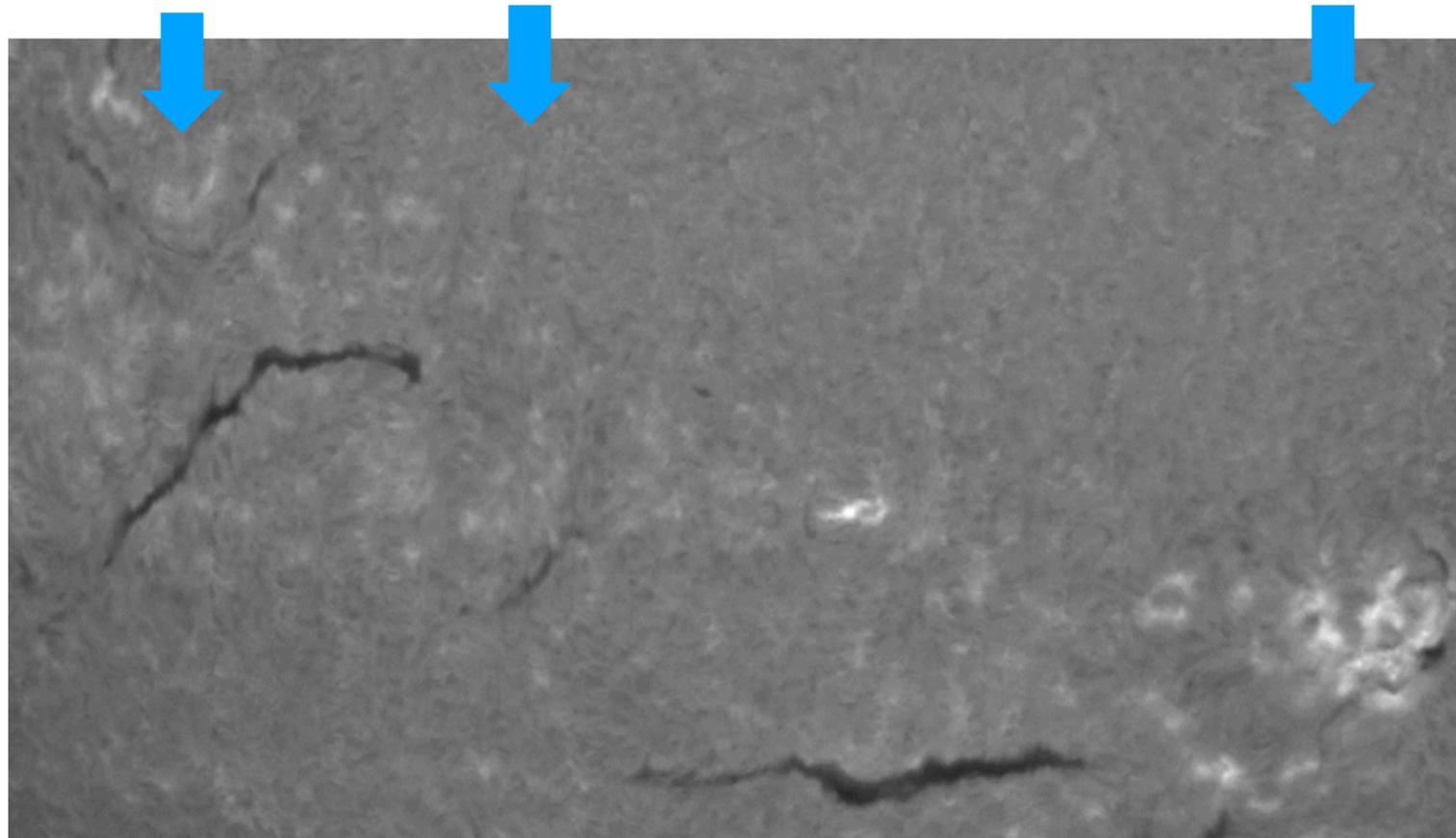
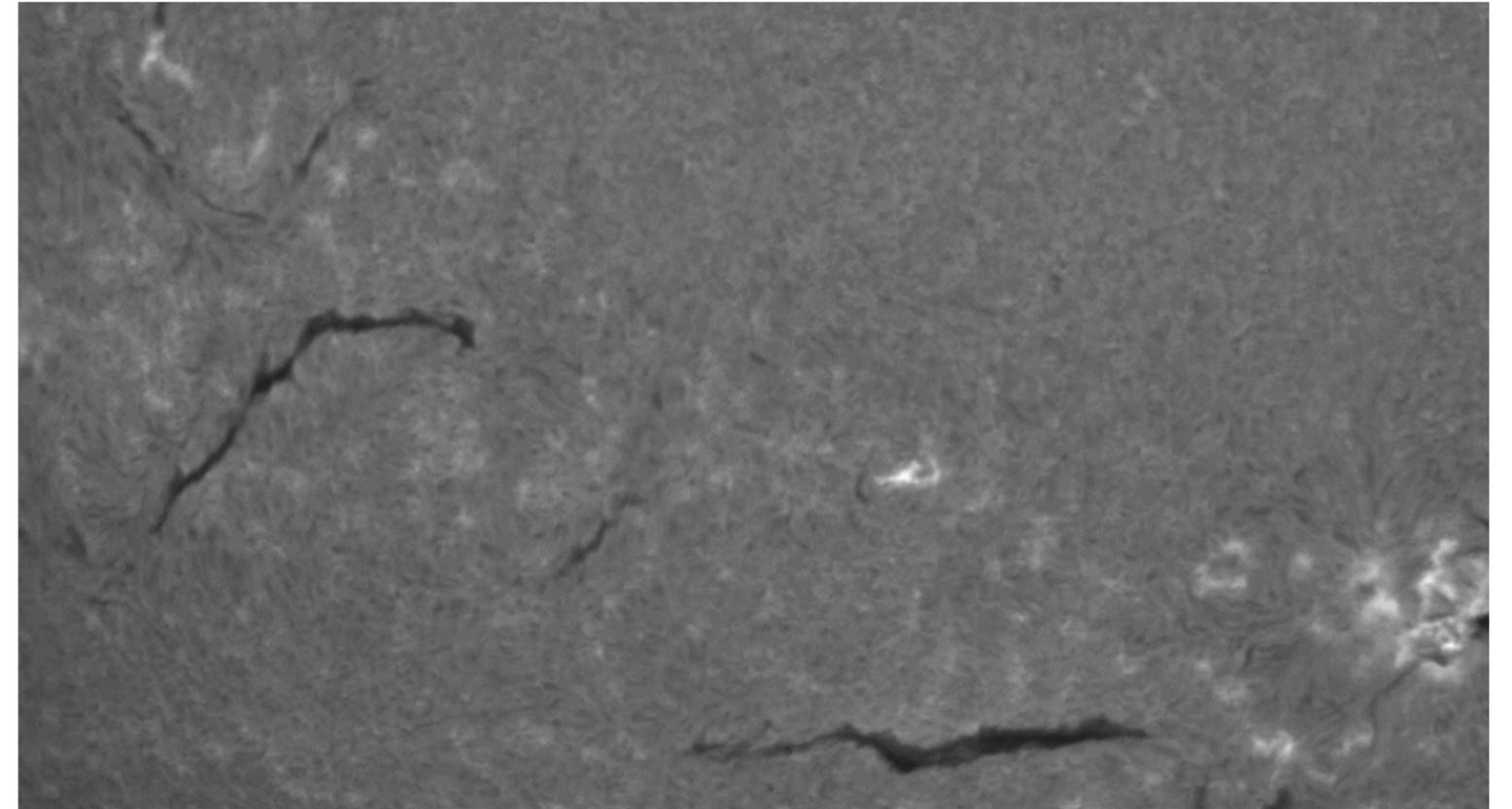


Image avec présence de « veines » de cisaillement dues à la turbulence

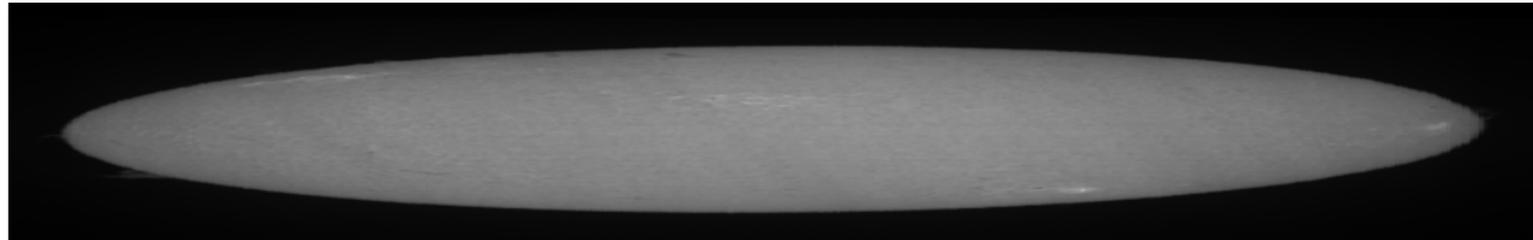


Bonne condition, faible turbulence

Vitesse de balayage

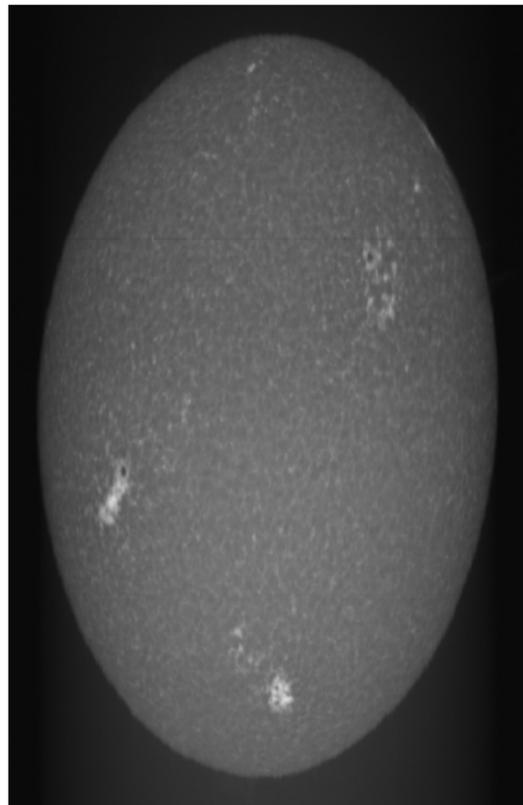
Regarder l'image _raw.png à la sortie d'INTI

Scan trop lent ou vitesse d'échantillonnage trop rapide

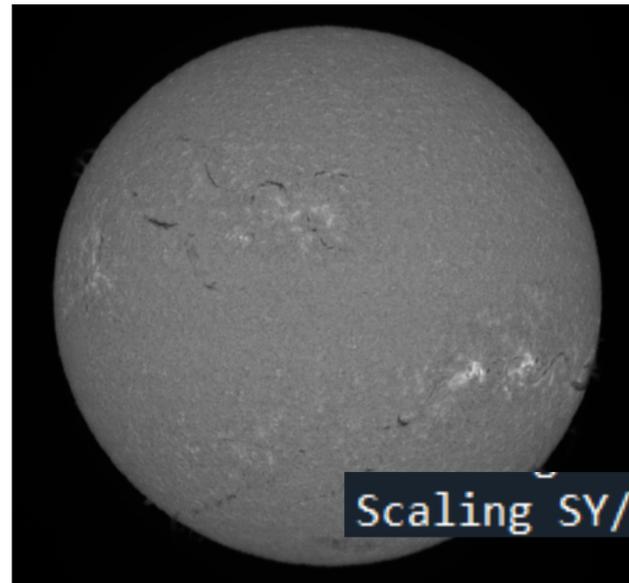


Augmenter le temps d'exposition et baisser le gain,
ou augmenter la vitesse de scan

Scan trop rapide ou vitesse d'échantillonnage trop faible

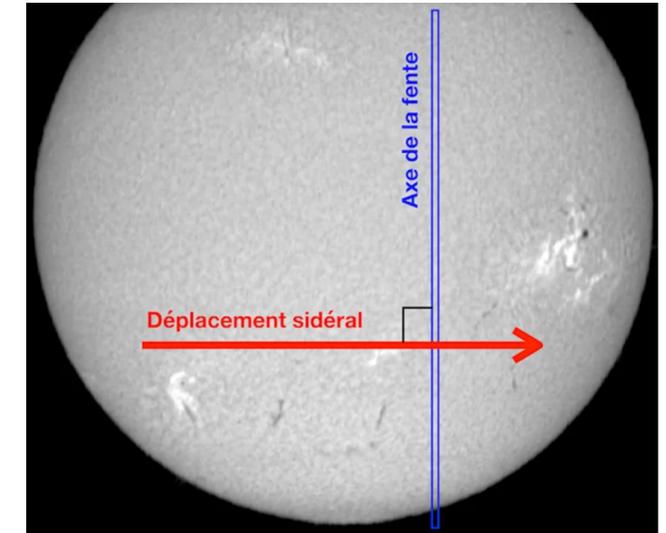


Réduire le temps d'exposition
et augmenter le gain,
ou réduire la vitesse de scan



Bon compromis !

Comment calculer la fréquence d'acquisition



Pour obtenir un disque presque rond du premier coup, il faut choisir un bon couplage entre la vitesse de défilement forcée choisie (4x, 8x, 16x...) et temps de pose pour chaque trame constituant le balayage, la taille des pixels de la caméra et la distance focale de la lunette.

- si V est le multiple de la vitesse sidérale adopté (V = 4, 8, 16...);
- si t est le temps d'exposition, en secondes;
- si p est la taille des pixels de la caméra (après binning), en microns;
- si F est la focale de la lunette, en millimètres;
- si delta est la déclinaison du Soleil au moment de l'observation,

Alors le temps t de pose à adopter pour obtenir un disque rond est donné par la formule :

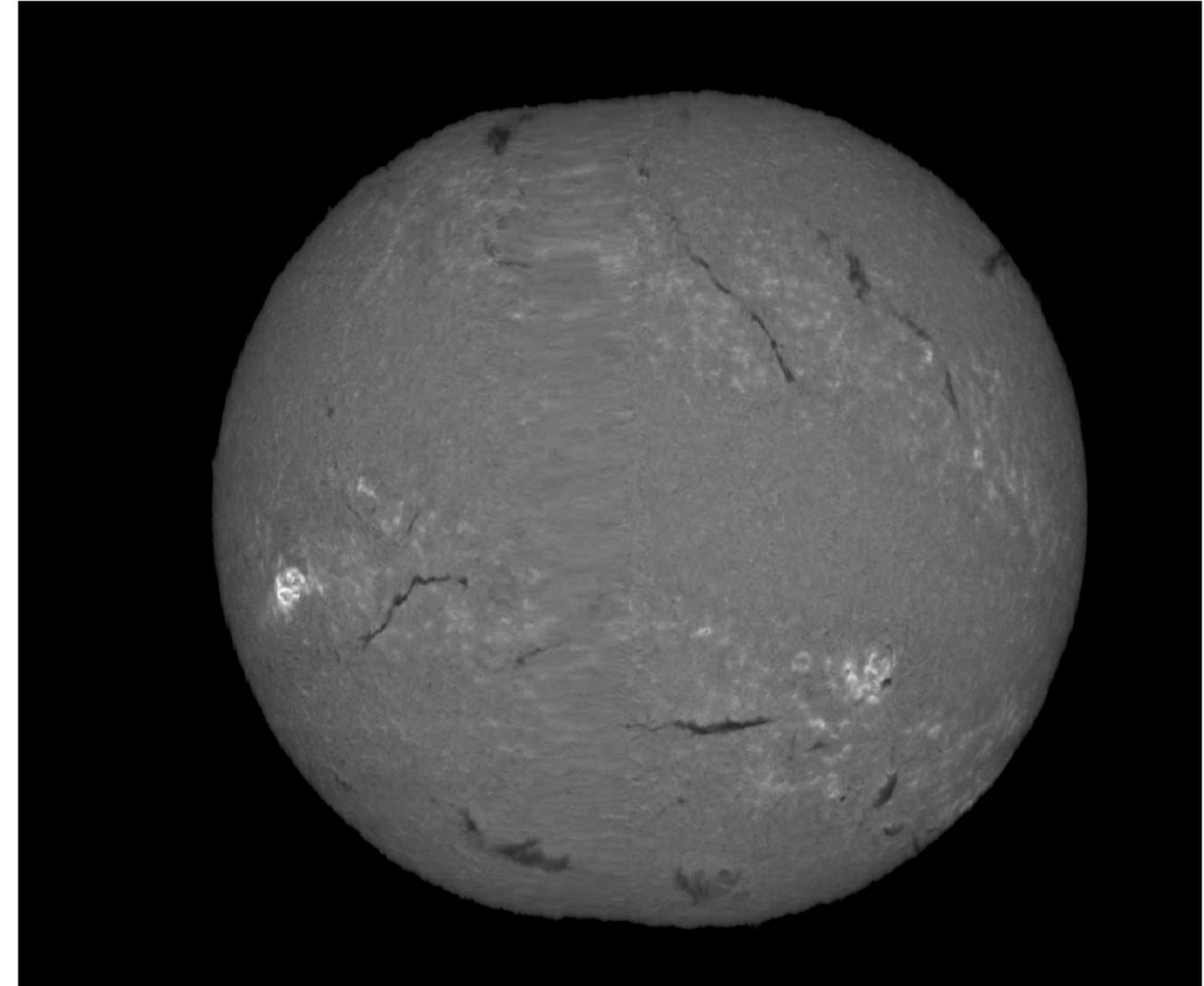
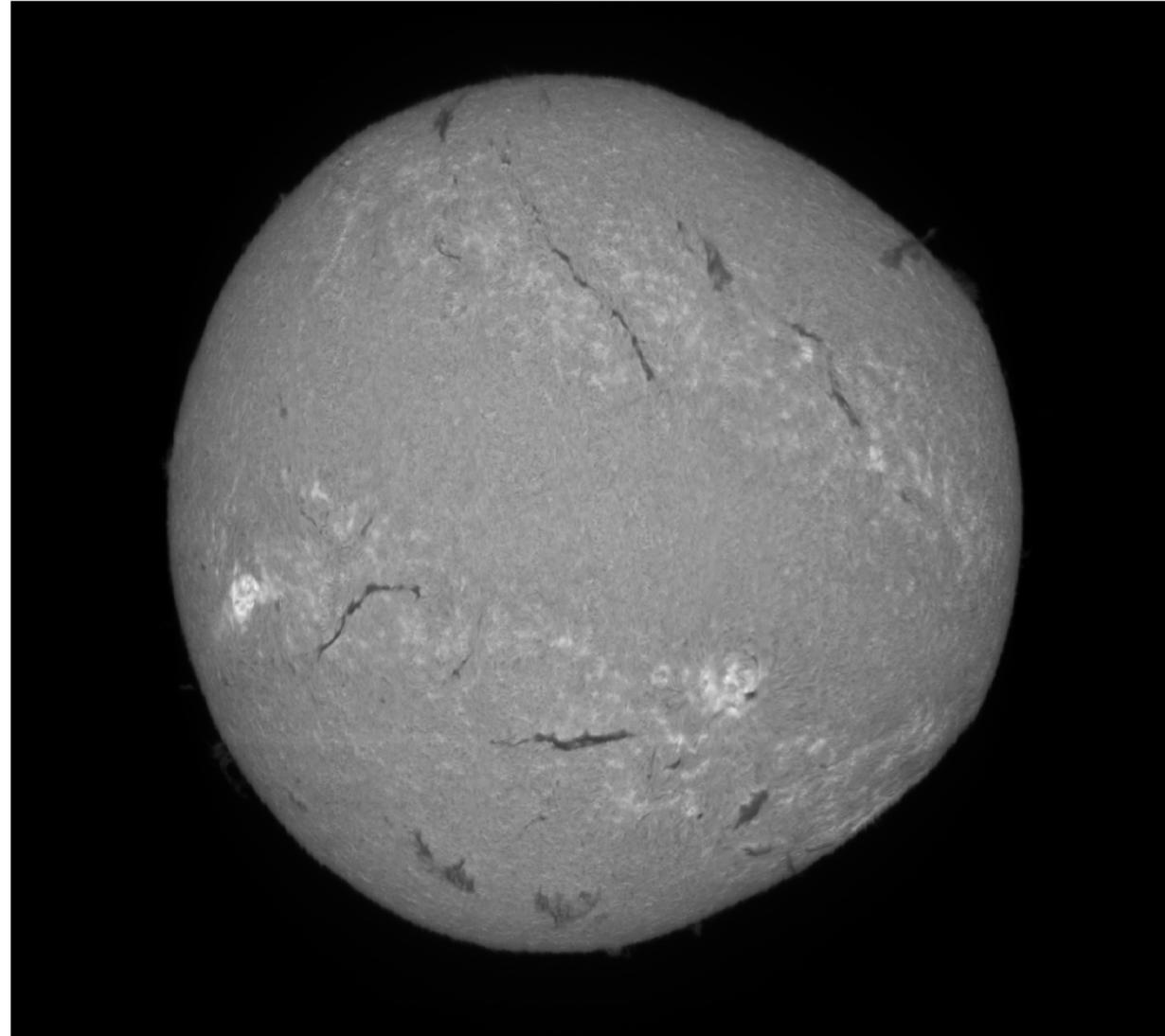
$$t = (8,79 \cdot p) / (F \cdot V \cdot \cos(\delta))$$

Prenons un exemple. On utilise une lunette de 420 mm de focale (F = 420), avec Star'Ex équipé d'une caméra ASI178MM exploitée en binning 2x2, soit une taille de pixel de 2 x 2,4 microns = 4,8 microns (p = 4,8). On décide de balayer le disque solaire à 16x la vitesse sidérale (V = 16). Au moment de l'observation, la déclinaison équatoriale du Soleil est de 23,42° (delta = 23,42) (pour un calcul expéditif, vous pouvez faire delta = 0°). Après calcul on trouve :

$$t = (8,79 \cdot p) / (F \cdot V \cdot \cos(\delta)) = (8,79 \cdot 4,8) / (420 \cdot 16 \cdot \cos(23,42)) = 0.00684 \text{ seconde}$$

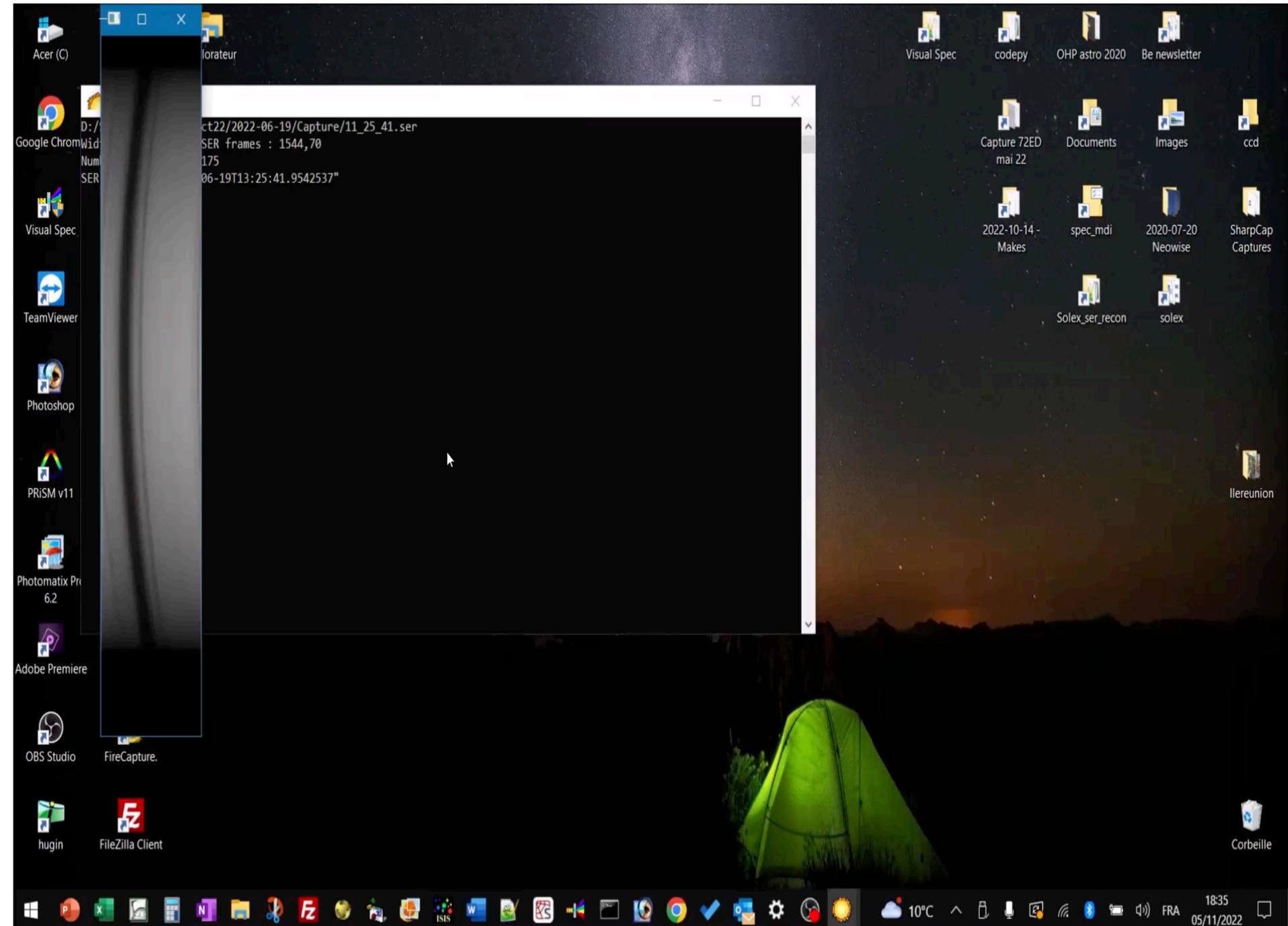
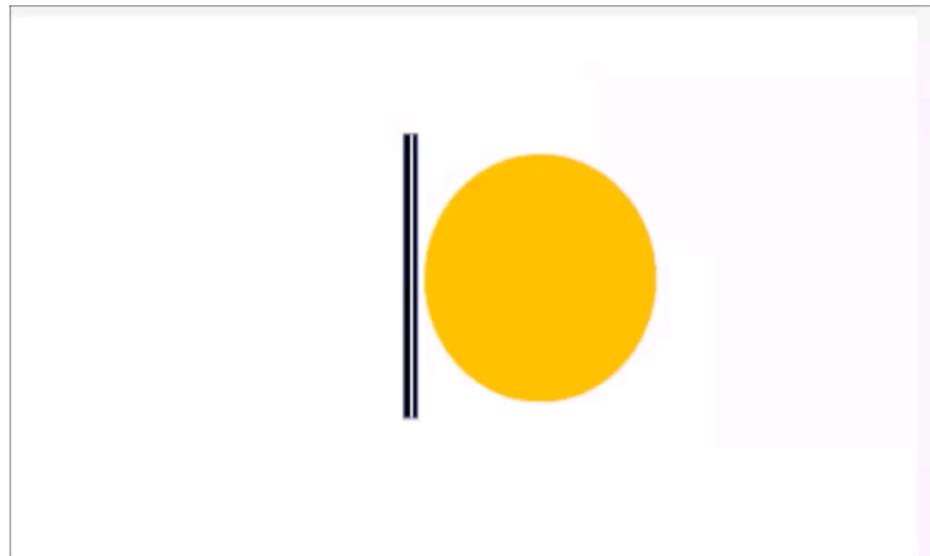
Fréquence d'acquisition images dans le SER : 1/0.00684 = 146 images par seconde (fps)

Attention aux variations de la vitesse de balayage de la monture

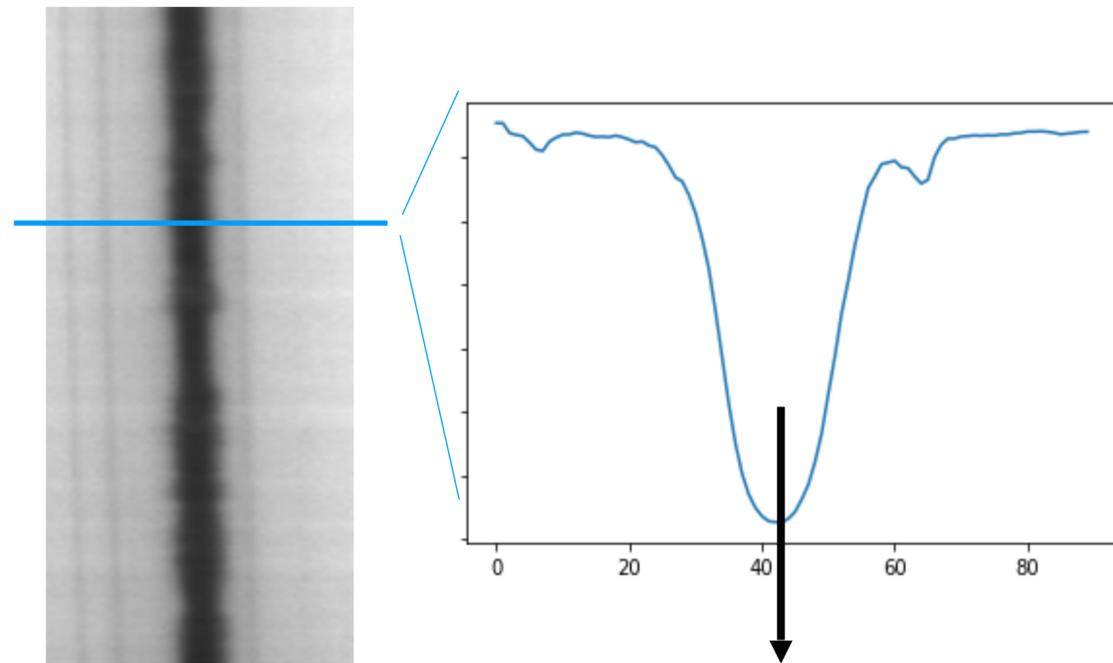


Dans l'intimité de la construction de l'image

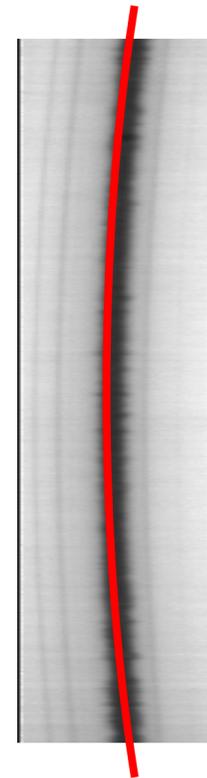
Scan = défilement du soleil le long de l'axe d'ascension droite



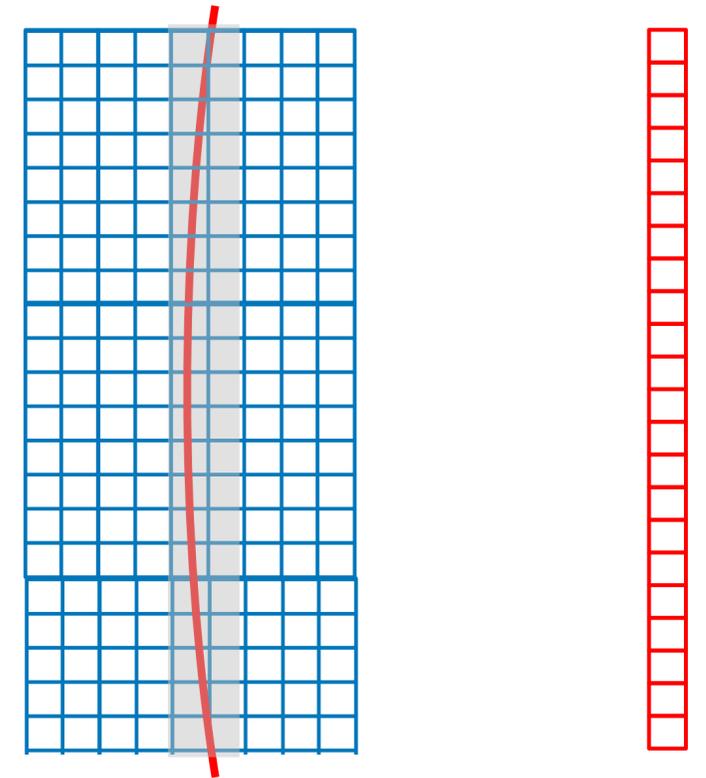
La relation entre longueur d'onde, pixels et intensité... formation de l'image



**Longueur d'onde des pixels de l'image
H-alpha, CaI H...**



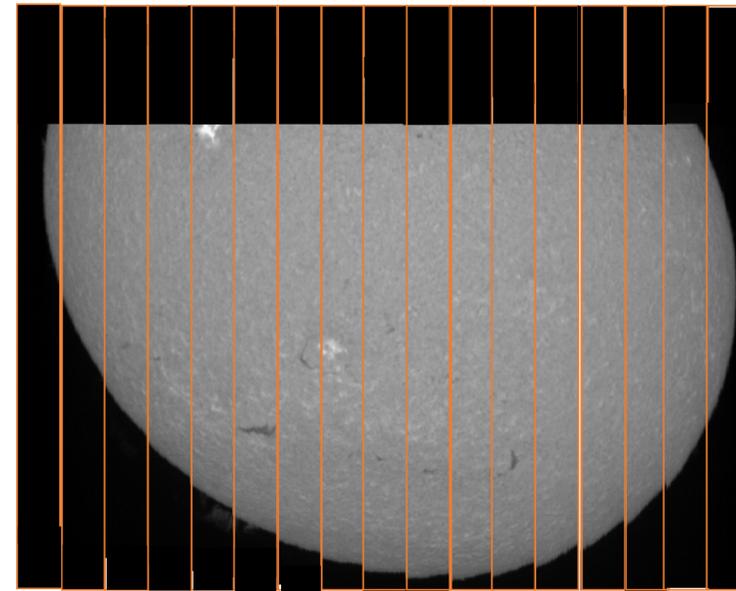
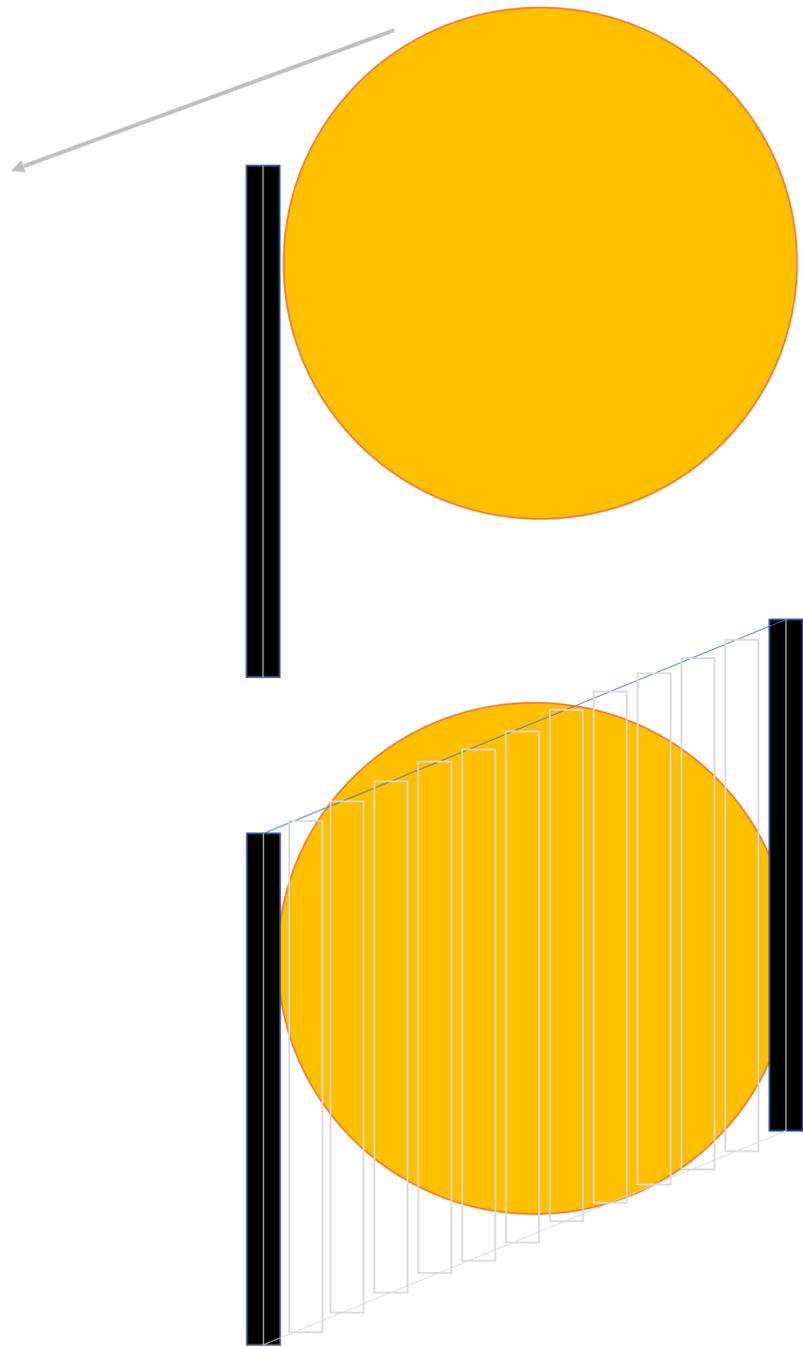
**Modélisation de la projection de
la fente sur l'image par un
polynôme à la longueur d'onde
choisie**



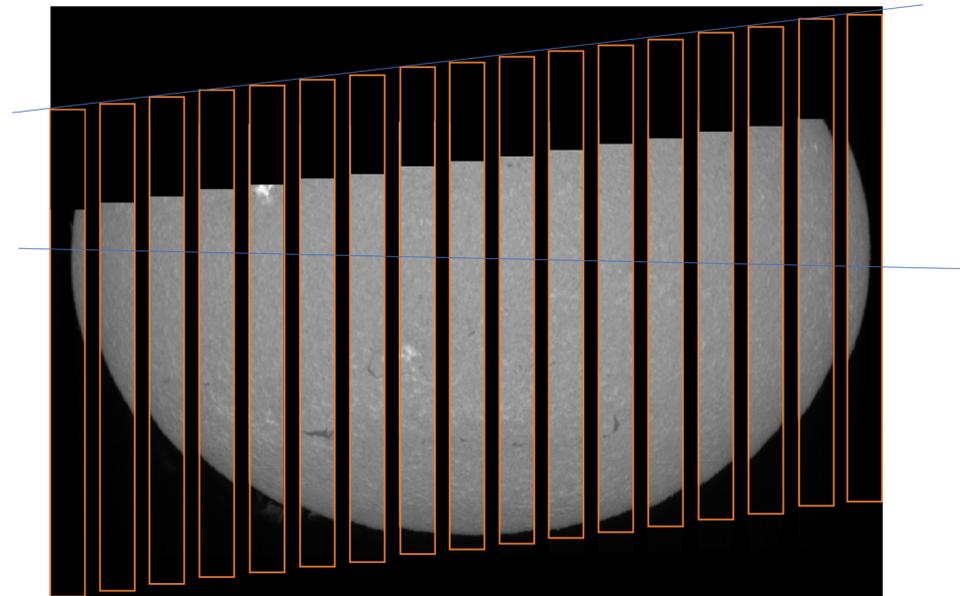
**Pour chaque trame, extraction de
l'intensité de la longueur d'onde
choisie à la fraction de pixel**

Dans INTI, en mode automatique, la longueur d'onde choisie est la raie spectrale dont l'absorption est la plus forte

La correction de tilt



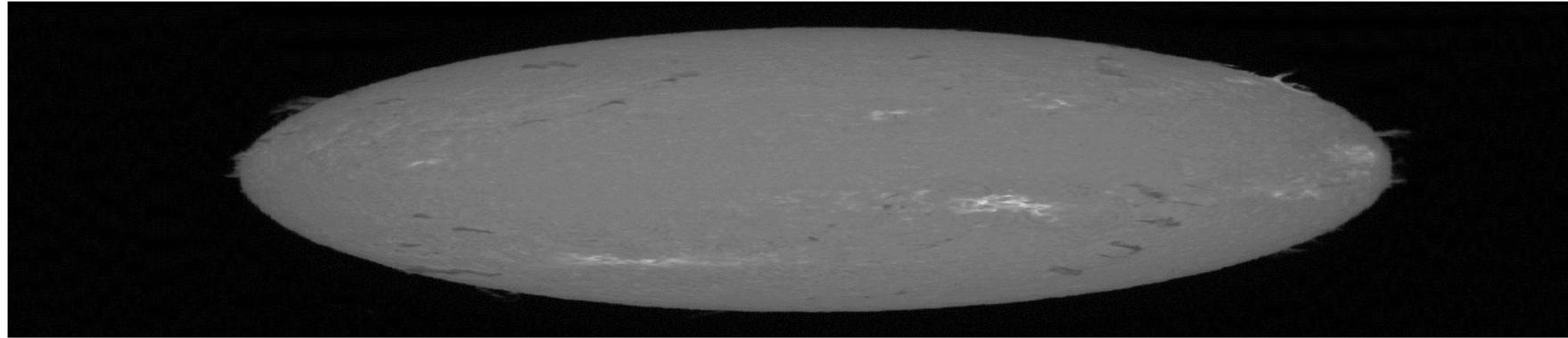
Si la fente n'est pas orienté perpendiculairement à l'axe E-W, axe RA, l'image est déformée



On corrige par un algorithme de glissement des colonnes suivant l'angle de tilt

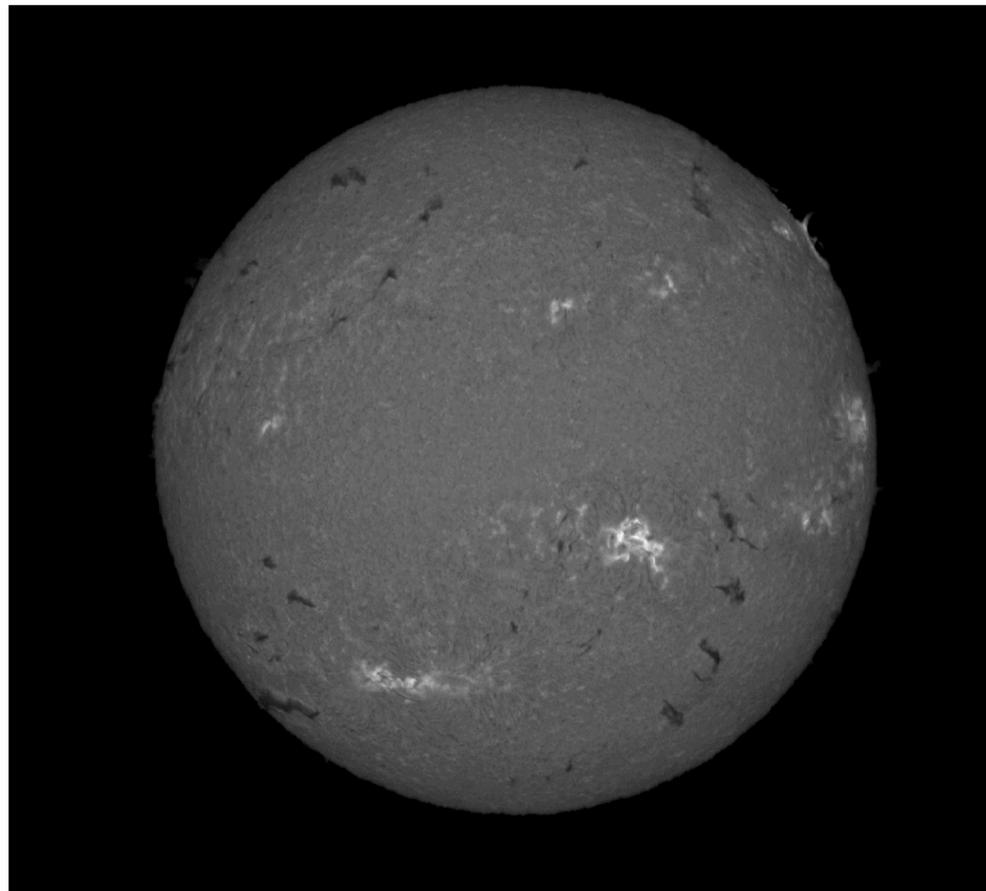
Il est fortement recommandé d'orienter le spectro (et donc la fente) pour minimiser cette déformation

Les images d'INTI



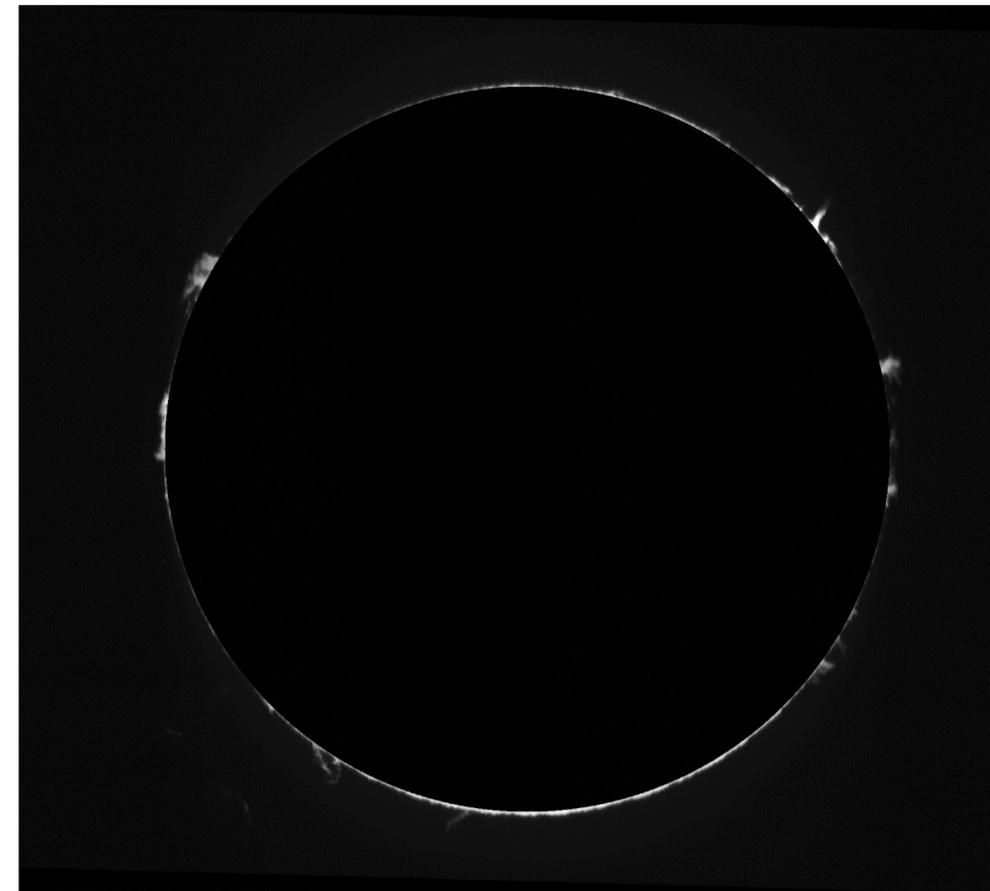
_10_50_23_raw.png

Image brute assemblée



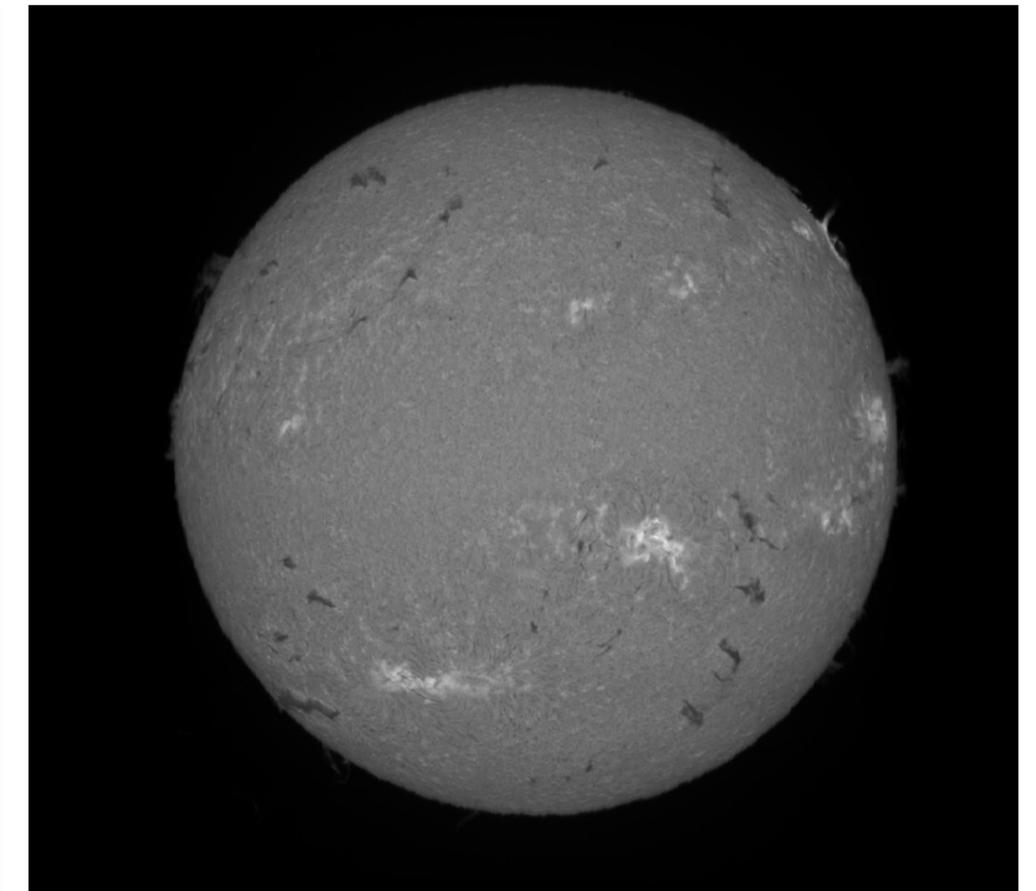
_10_50_23_disk.png

Image avec seuils modérés



_10_50_23_protus.png

Image avec seuils resserrés et
disque occulteur simulé

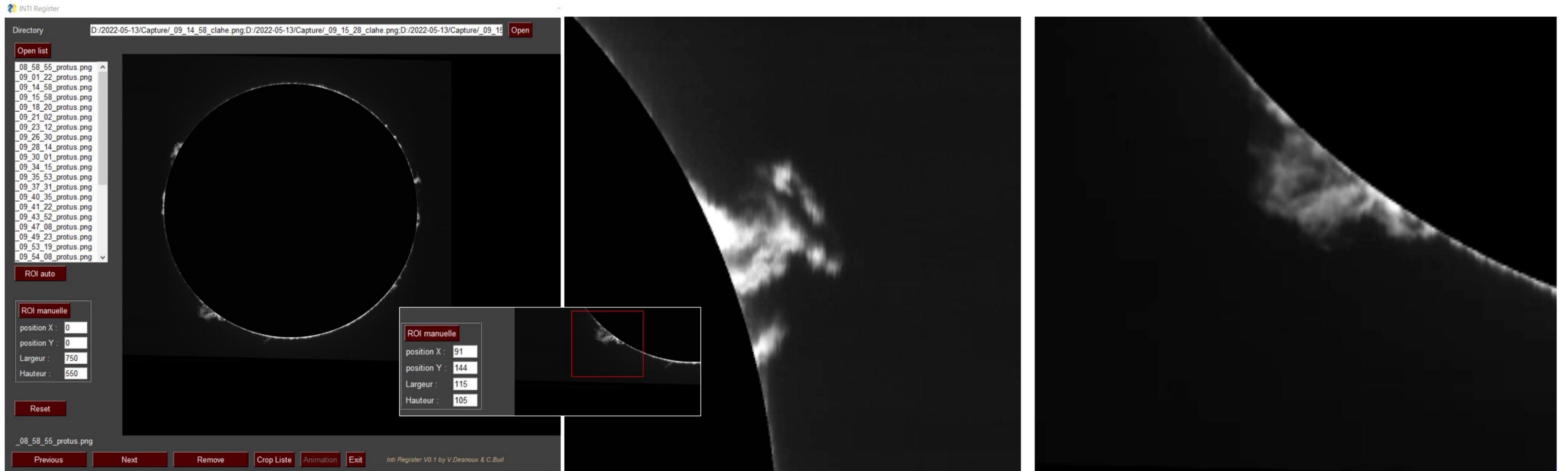


_10_50_23_clahe.png

Image avec réhaussement
Contrast Local Histogramme Egalisation

Observations de protubérances

Animation de protubérance avec un companion d'INTI... INTI_register

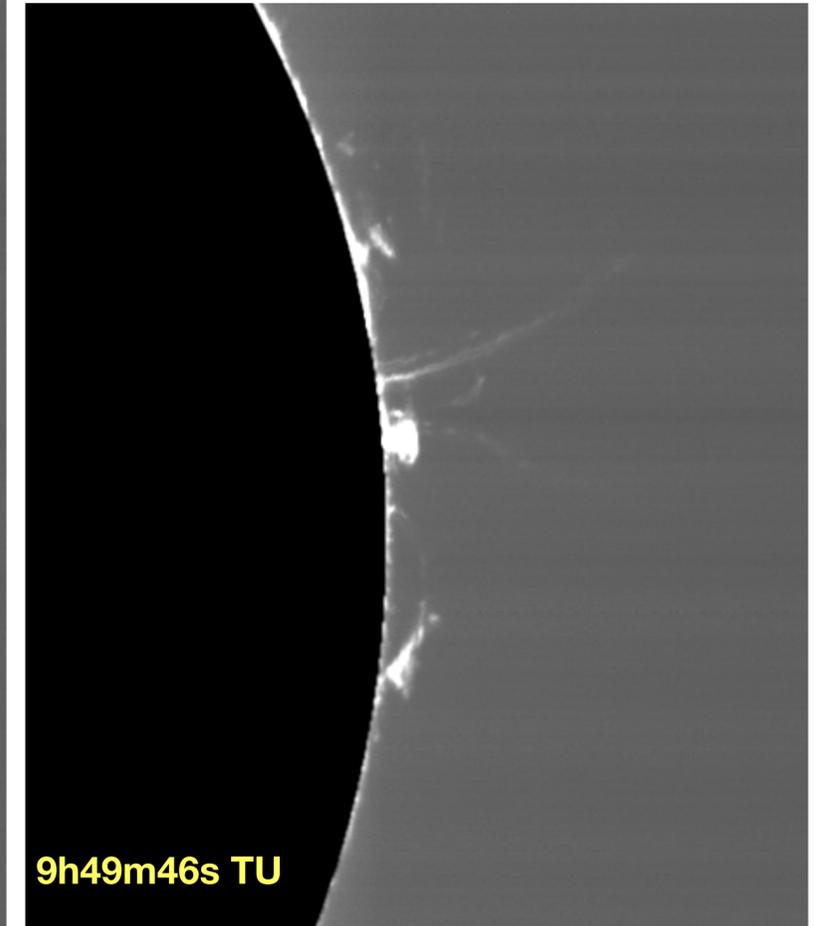
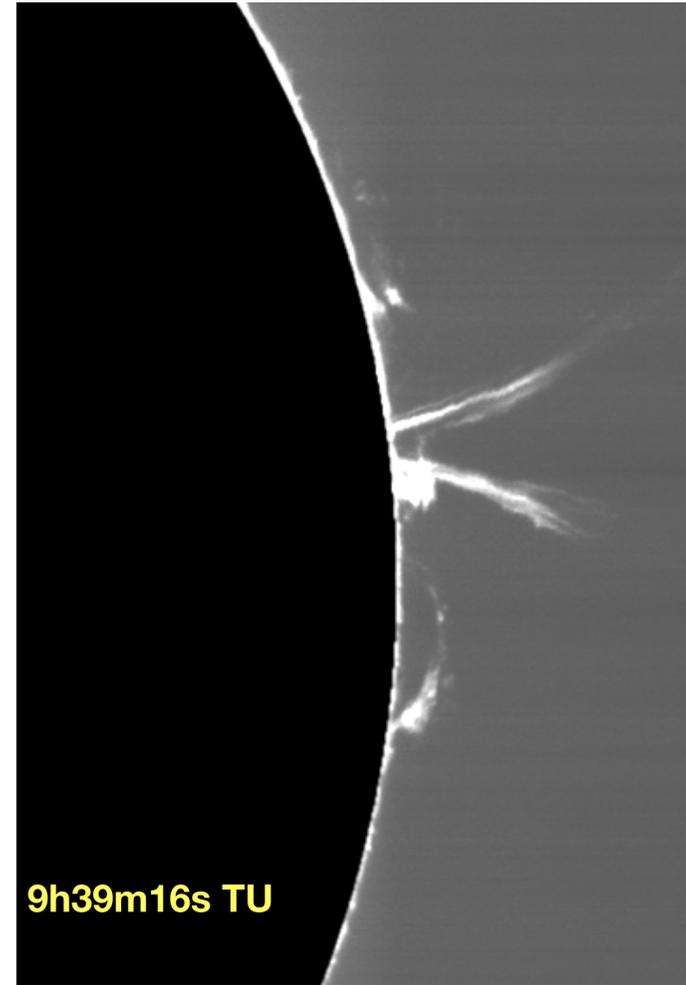
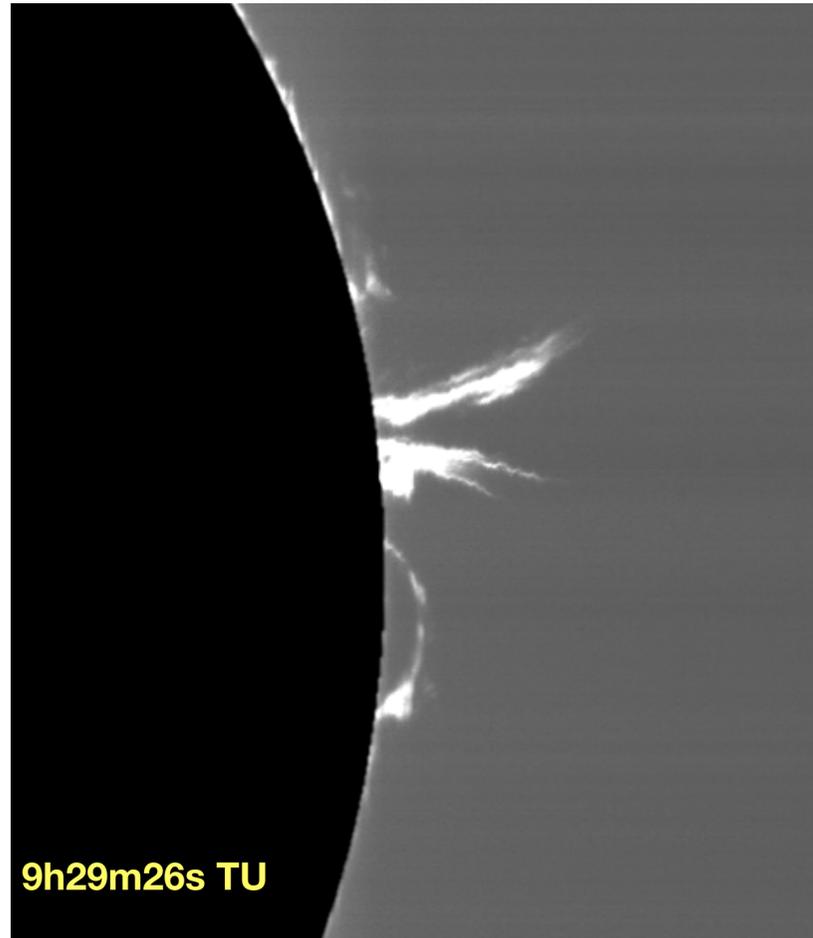
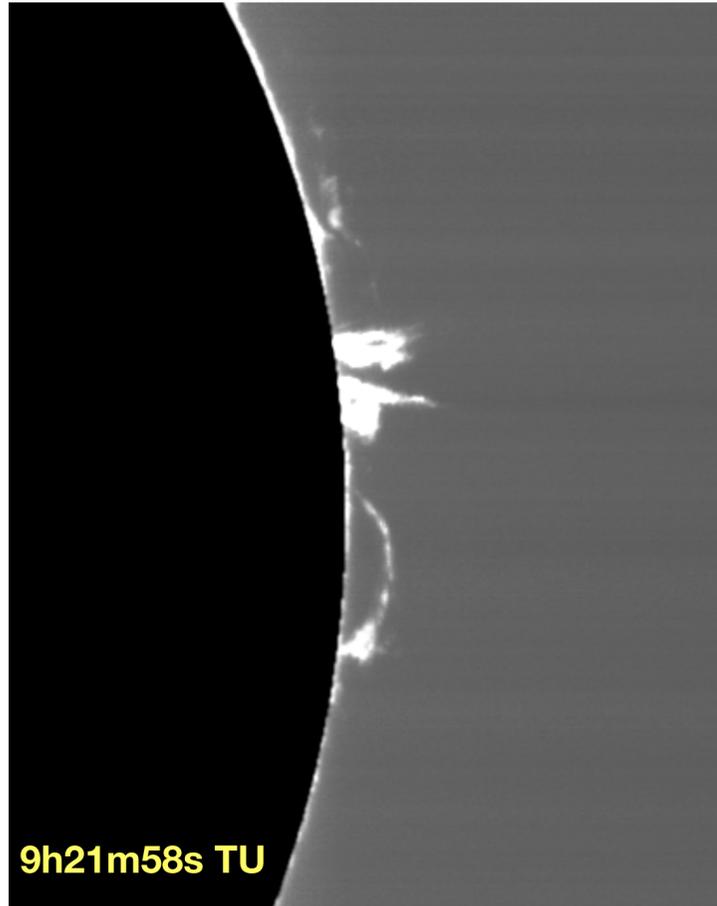


7 mars 2022 – Paris – Acuter
Caméra ZWO ASI 178 bin2 exp 5ms gain 143

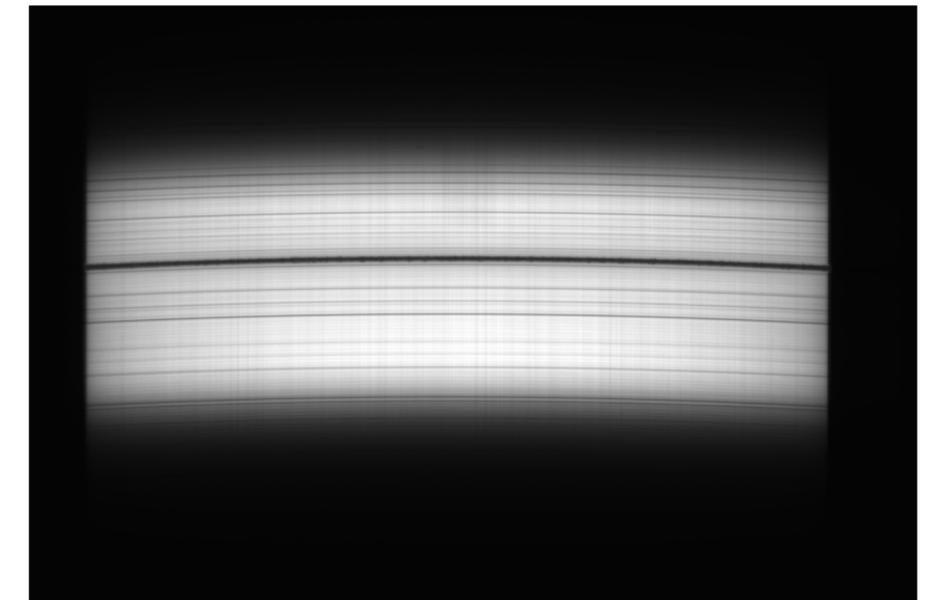
13 mai 2022 – Paris -Lunette SkyWatcher 72 ED
Camera ZWO 178 bin2 exp 2.6ms Gain 127

Observation à haut contraste

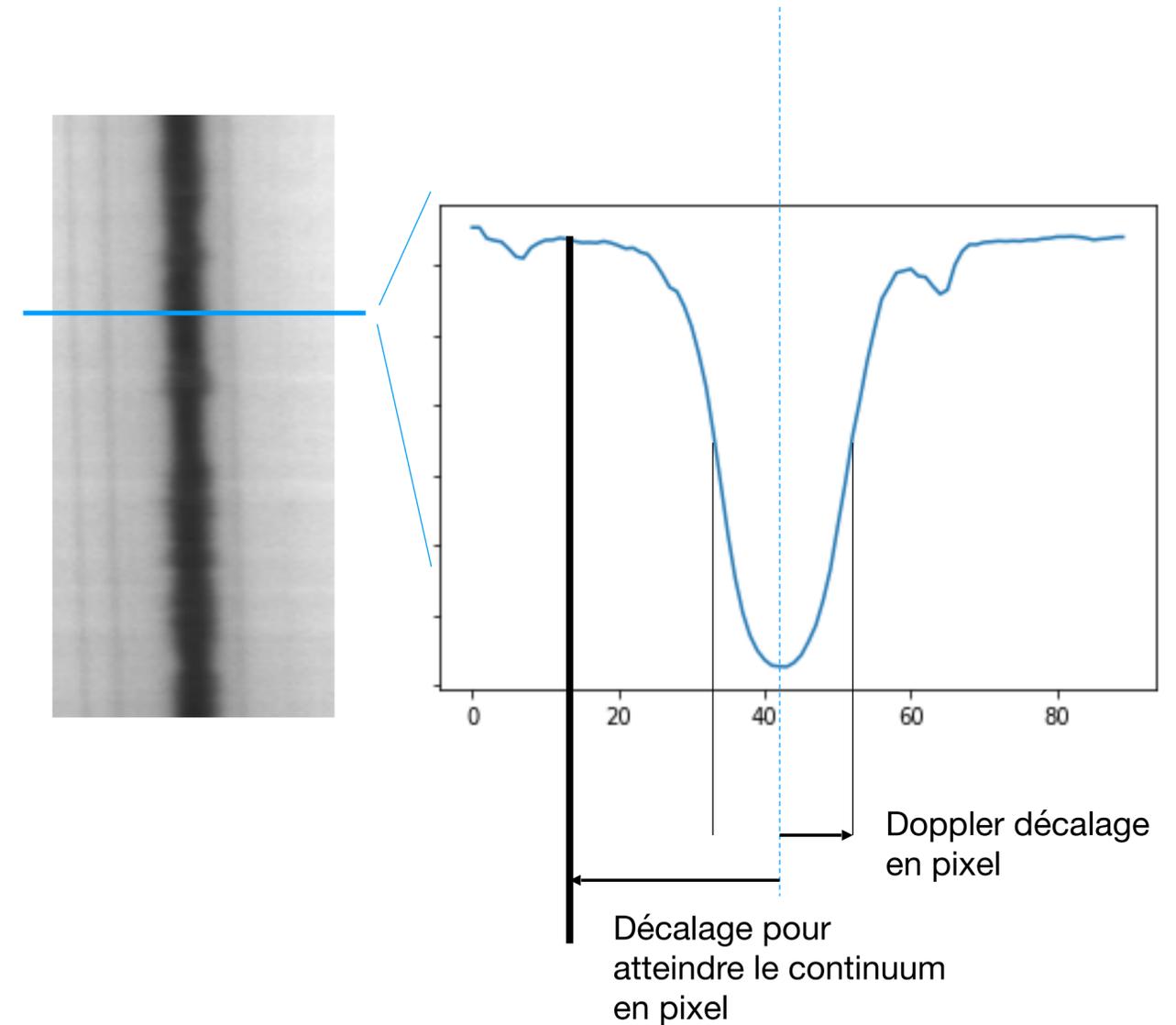
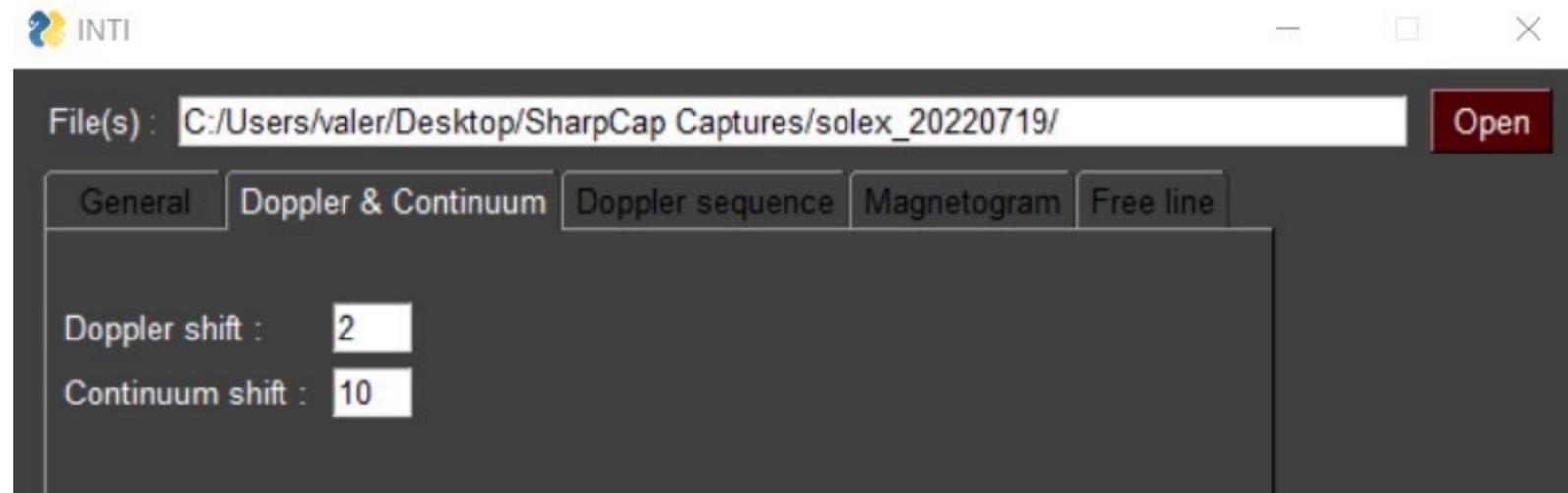
1 mai 2022 - Sol'Ex sur Sky-Watcher 72ED



Utilisation possible et optionnelle d'un pré-filtre à coût modéré pour un accroissement du contraste (ici un Astrodon H-alpha 6 nm)



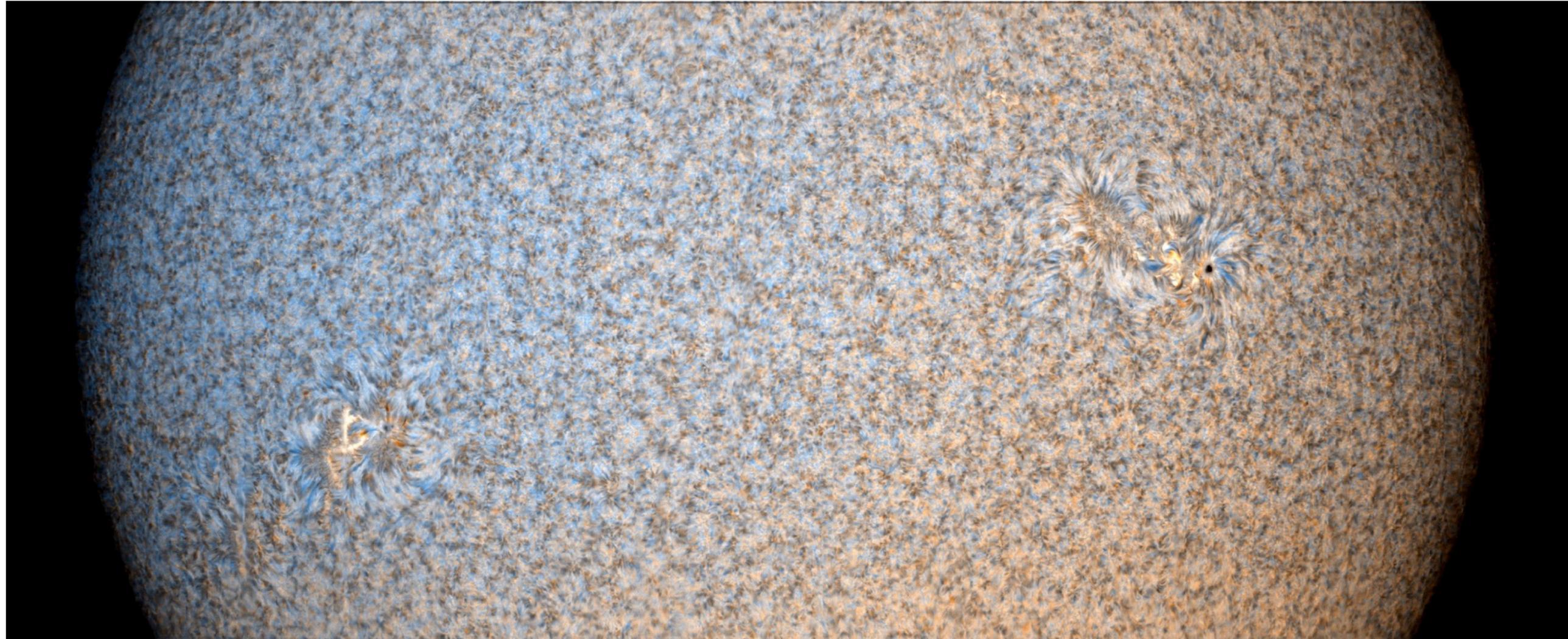
Exploitation du spectre autour d'une raie



INTI permet de reconstruire une image monochromatique à une longueur d'onde relative par rapport au centre de la raie

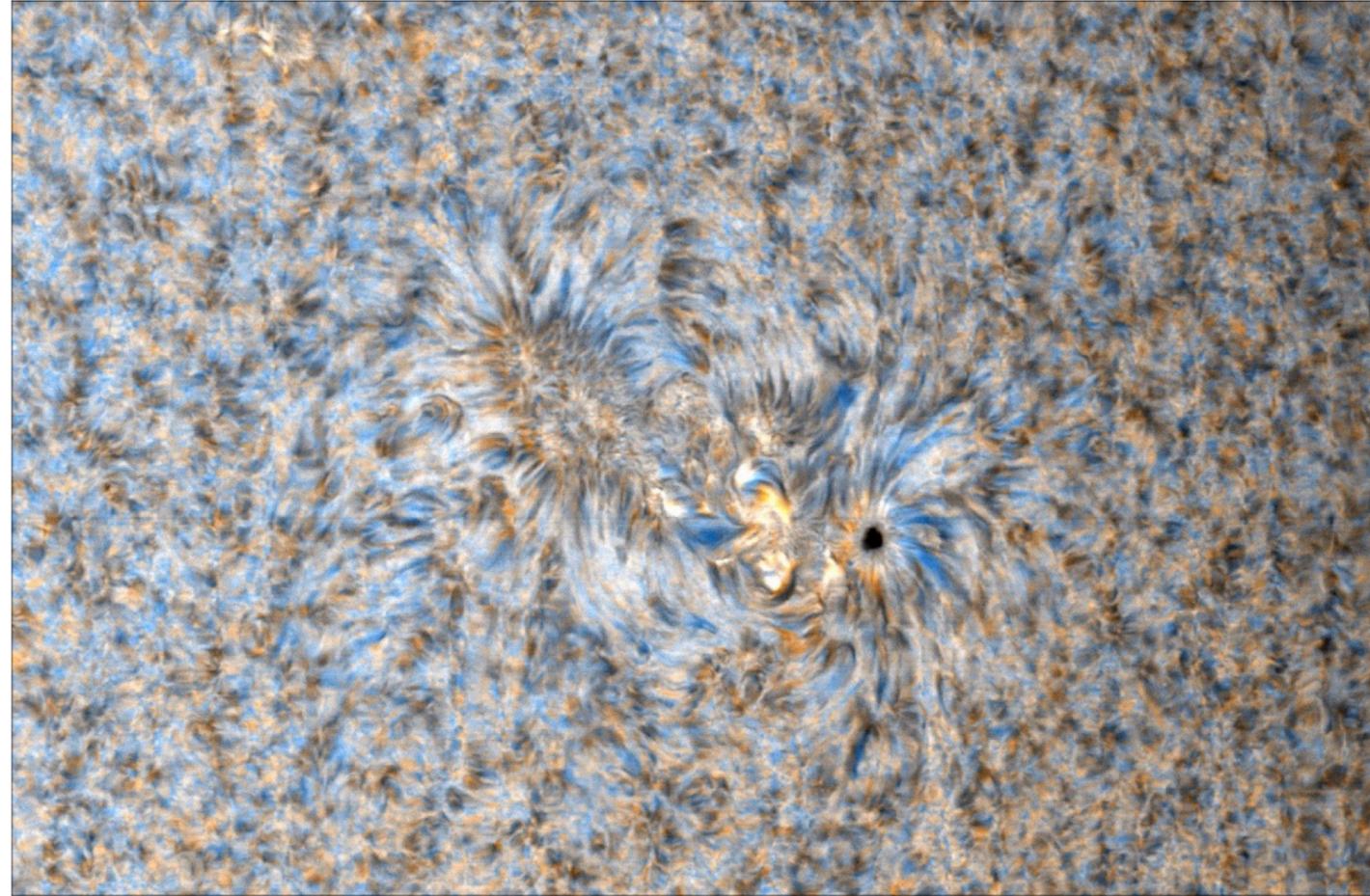
Observation Doppler de la rotation du Soleil

Mesure de la rotation du Soleil par l'observation du décalage Doppler de la raie H-alpha (entre le bord est et le bord ouest)



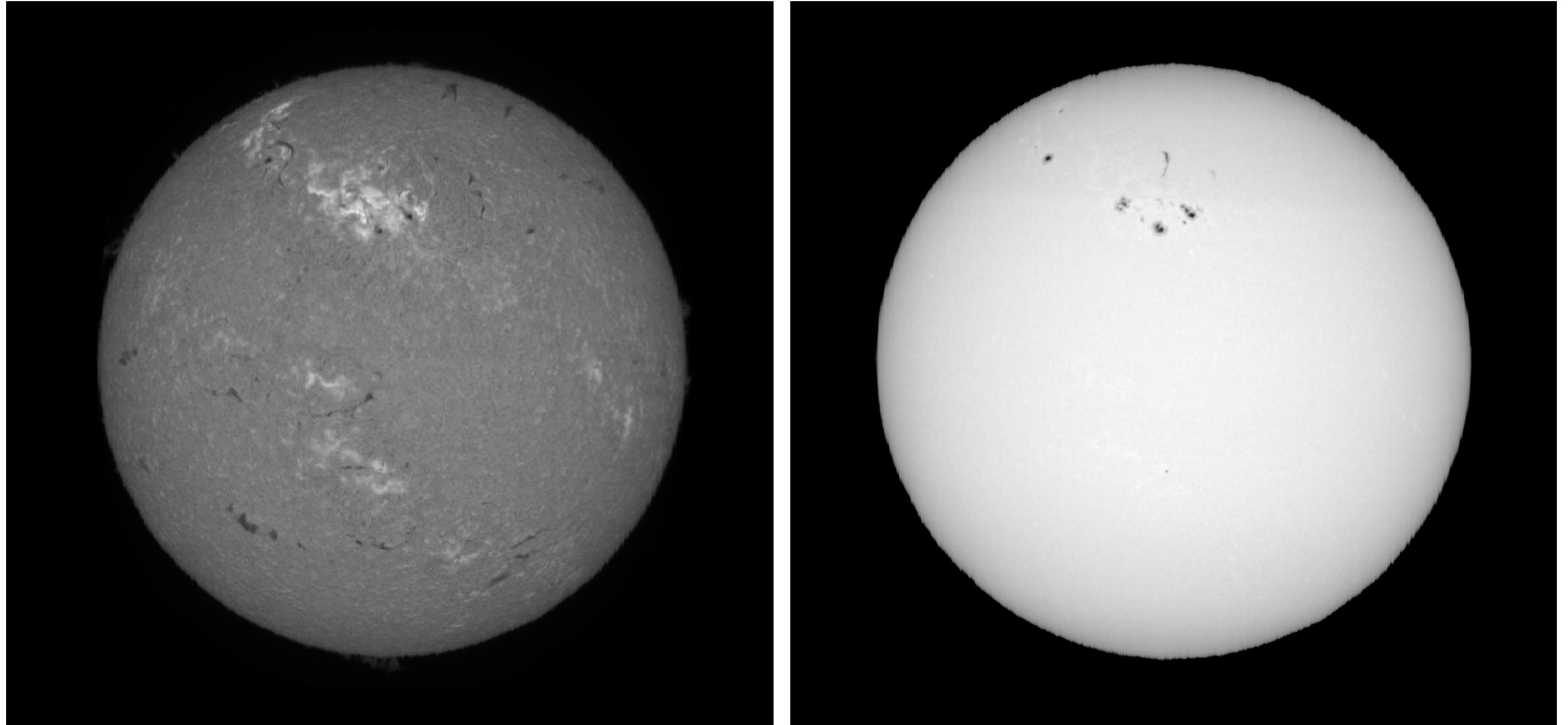
Dopplergramme : vue dynamique de la surface (vision 3D)

Détail du champ de vitesses radiales



Les intensités informent sur la vitesse et la couleur sur la direction radiale des gaz.

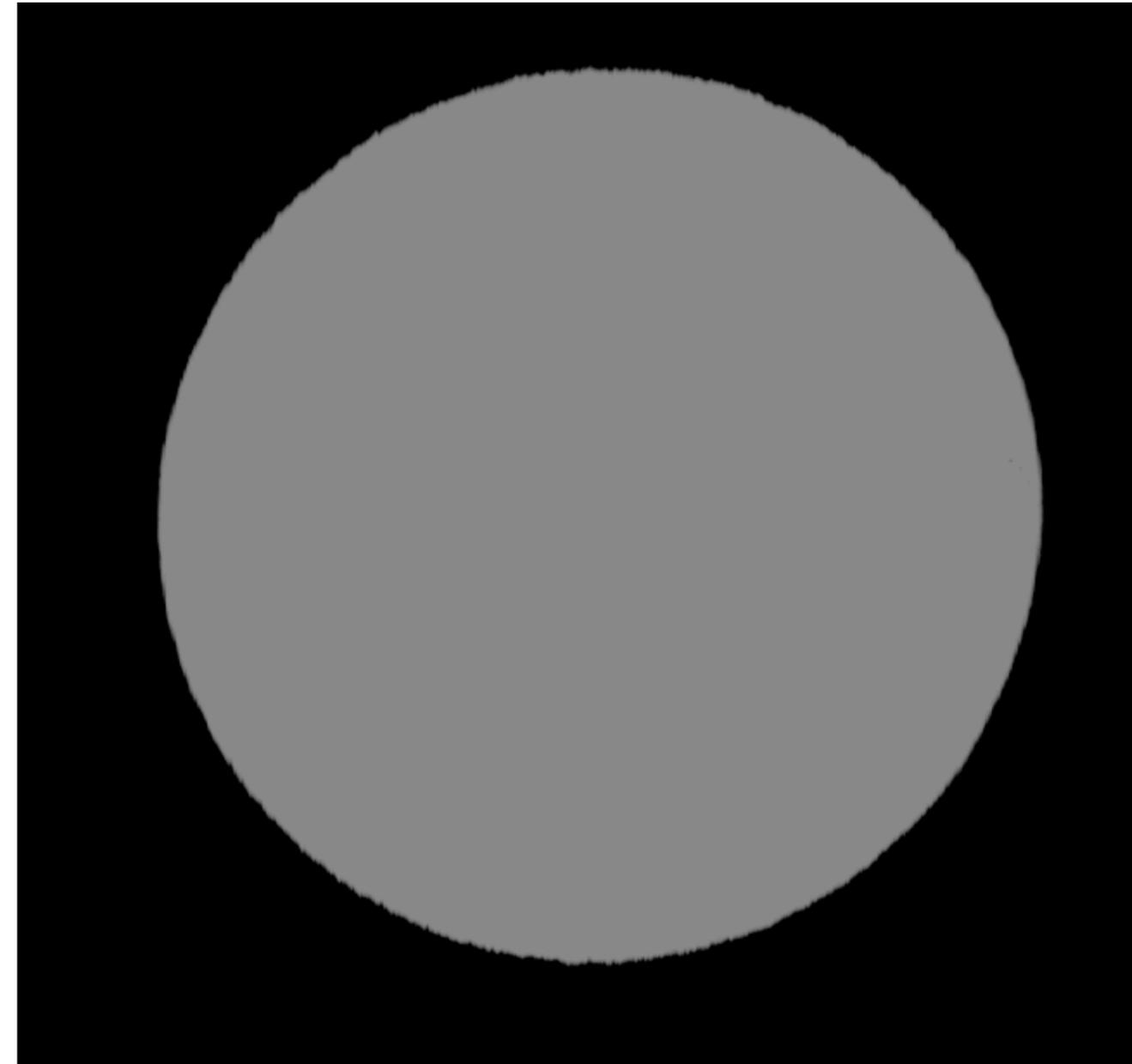
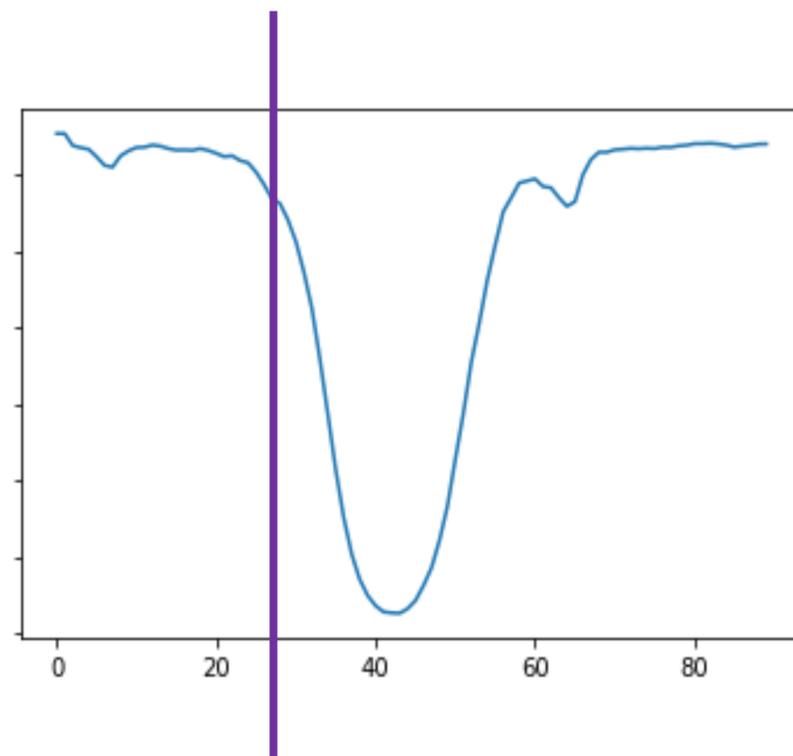
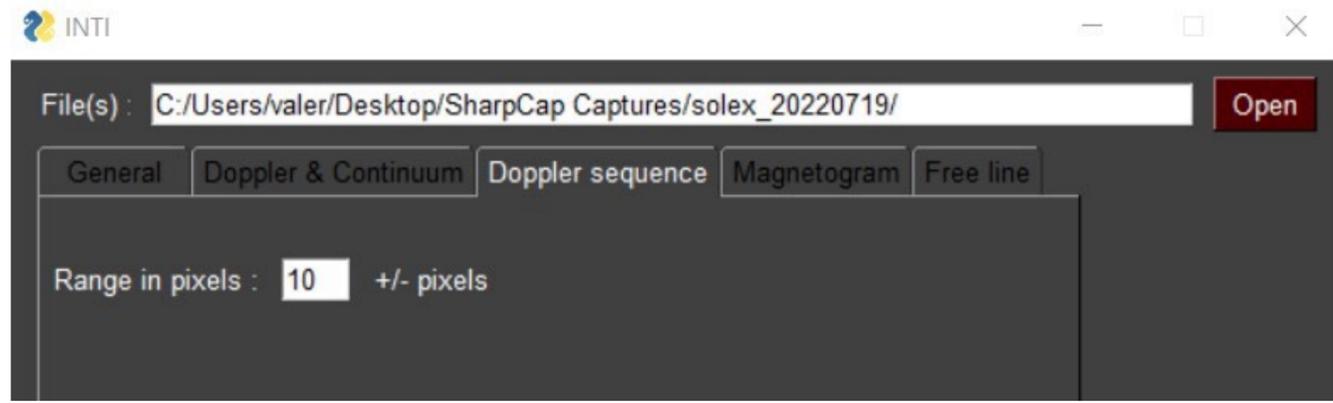
L'image de continuum donne une image de la photosphère



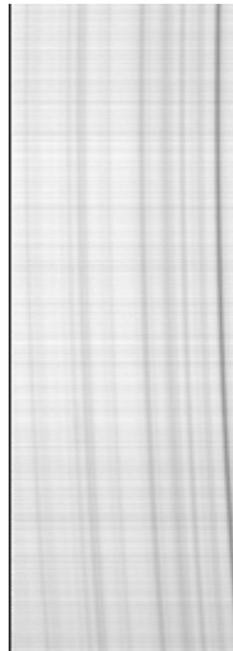
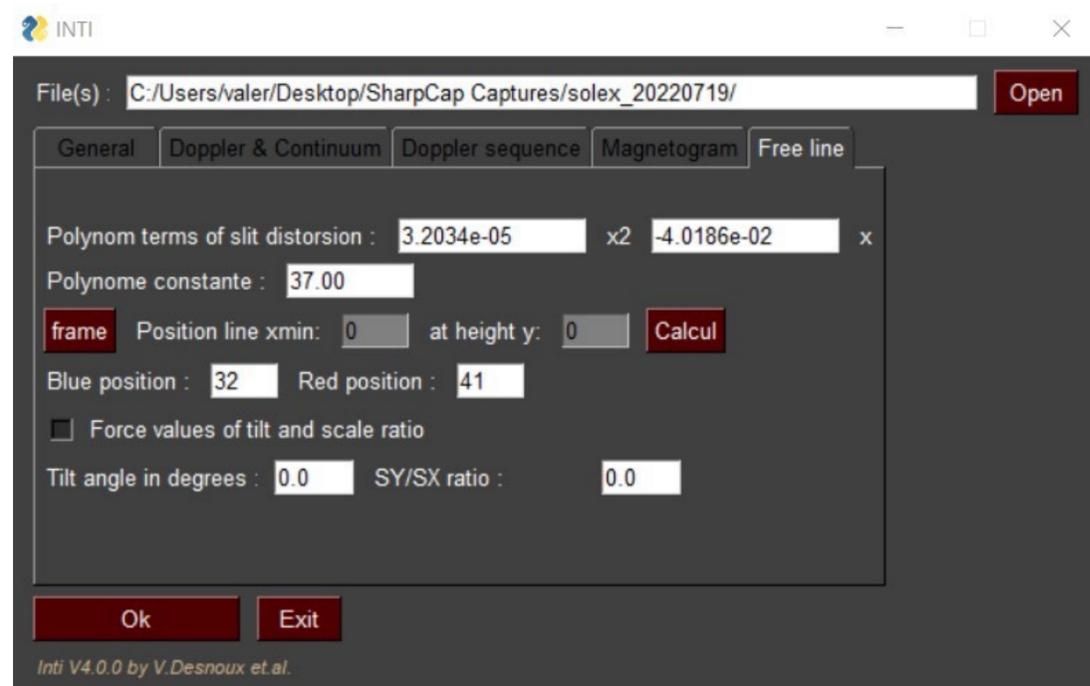
21 Avril 2022 – Paris – lunette skywatcher 72ED – ND8 – bin2 exp 6ms gain 59 – décalage de 12 pixels

Séquence multi-chromatique

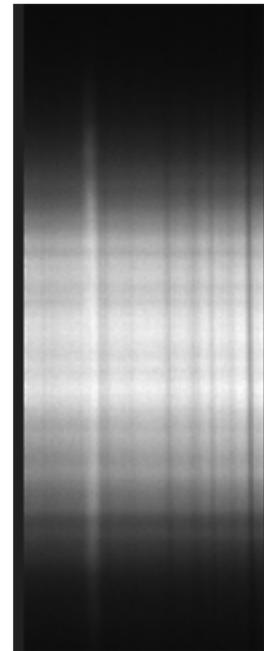
Reconstruire une image chromatique en parcourant les longueur d'onde autour du centre de la raie



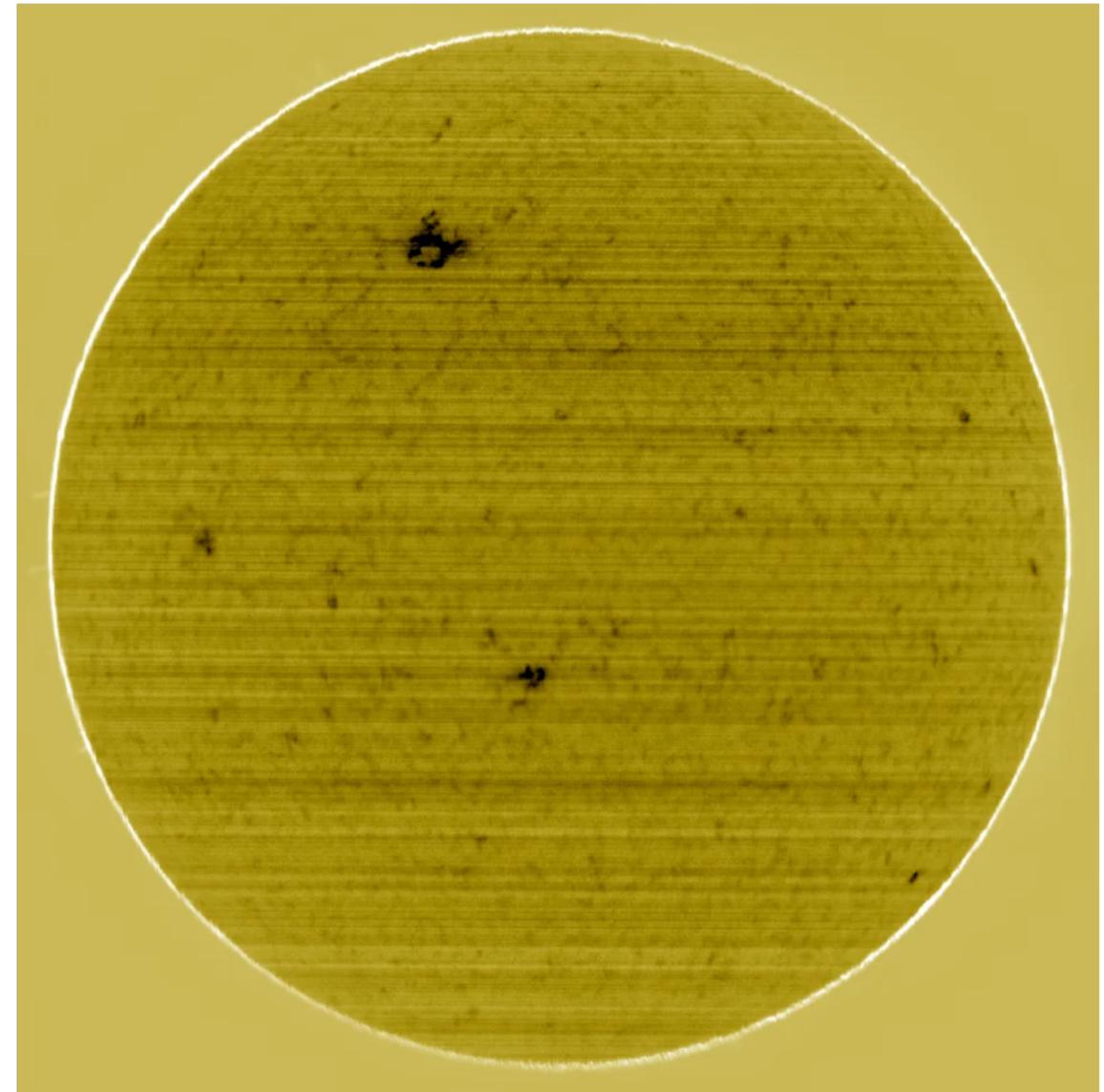
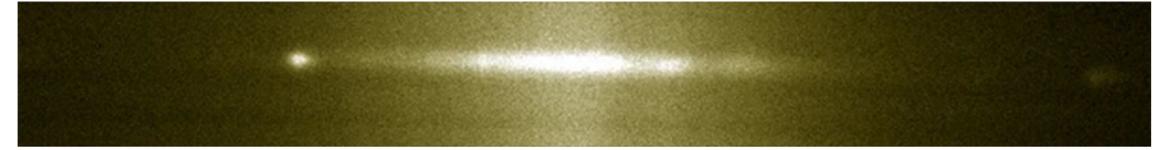
Reconstruction sur raie libre



La raie de l'hélium D3 est trop faible, ce n'est pas la raie la plus profonde, il faut identifier sa position manuellement en pixel



Localisation de la position de la raie de l'hélium D3 sur un scan statique en bord de disque, la raie apparait en émission

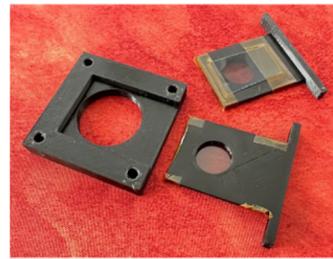


Raie de l'hélium D3

Encore plus fort ! Magnétogramme solaire

L'observation du champ magnétique (1/4)

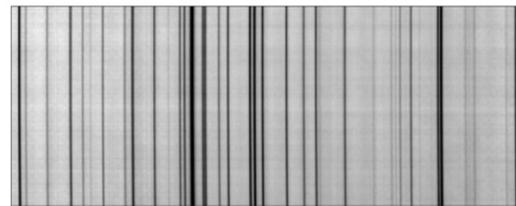
L'application « magnétogramme » est typique du projet Sol'Ex : possibilité de pratiquer des expériences physiques pointues (effet Zeeman) de manière économique et ludique



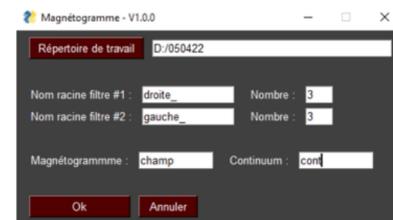
Porte filtre en impression 3D



Mesure de la polarisation circulaire en détournant des lunettes de cinéma 3D



Fe I 6173 A (g = 2.50)

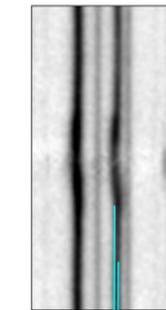
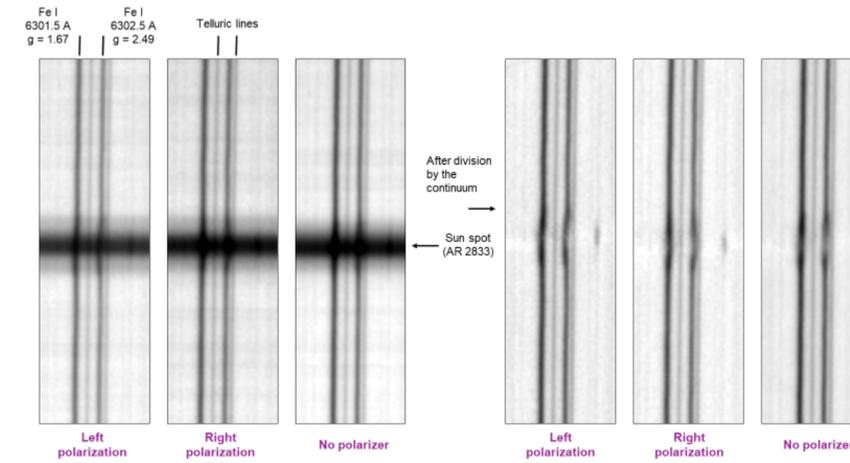


Outil logiciel de traitement fourni

RCE – 11-13 Novembre 2022

L'observation du champ magnétique (3/4)

La haute résolution spectrale de Sol'Ex permet de détecter l'effet Zeeman



Formule Zeeman : décalage spectral d'une raie en fonction du champ magnétique longitudinal B_z :

$$\Delta\lambda_{JJ} = \pm 4,67 \times 10^{-13} g \lambda^2 (B_z)$$

Décalage : 0,085 A au niveau de la raie Fe I 6302 A, aussi :

$$\lambda = 6302,5 \text{ A}$$

$$\Delta\lambda = 0,085 \text{ A}$$

$$g = \text{Landé factor} = 2,49$$

-> $B_z = 1840 \text{ Gauss}$

1,3 pixel = 0,085 A

RCE – 11-13 Novembre 2022



L'observation du champ magnétique (4/4)

Magnétogramme (utilisation de la raie Fe I 6173 A)

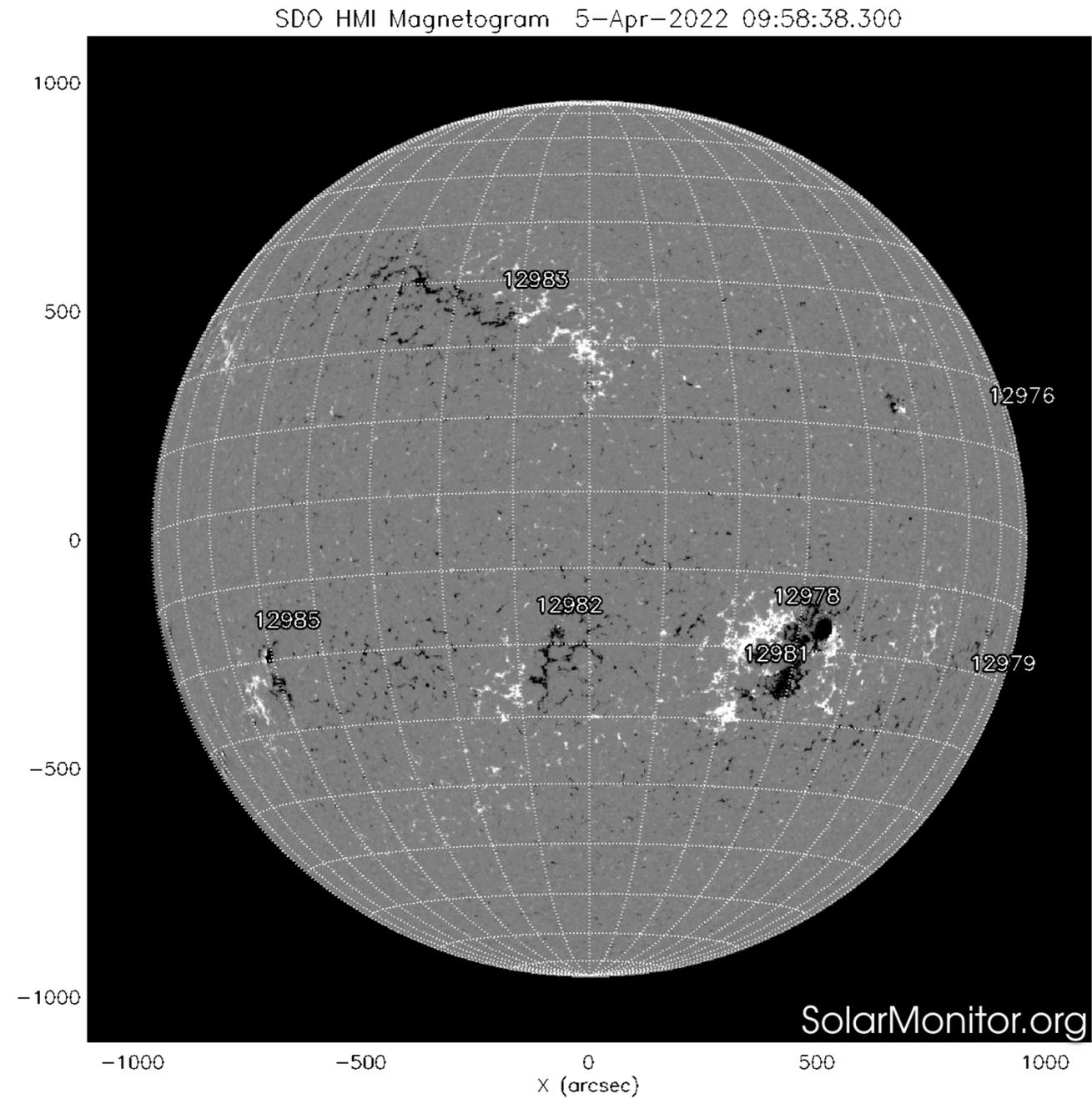


Image SDO le 5 avril 2022

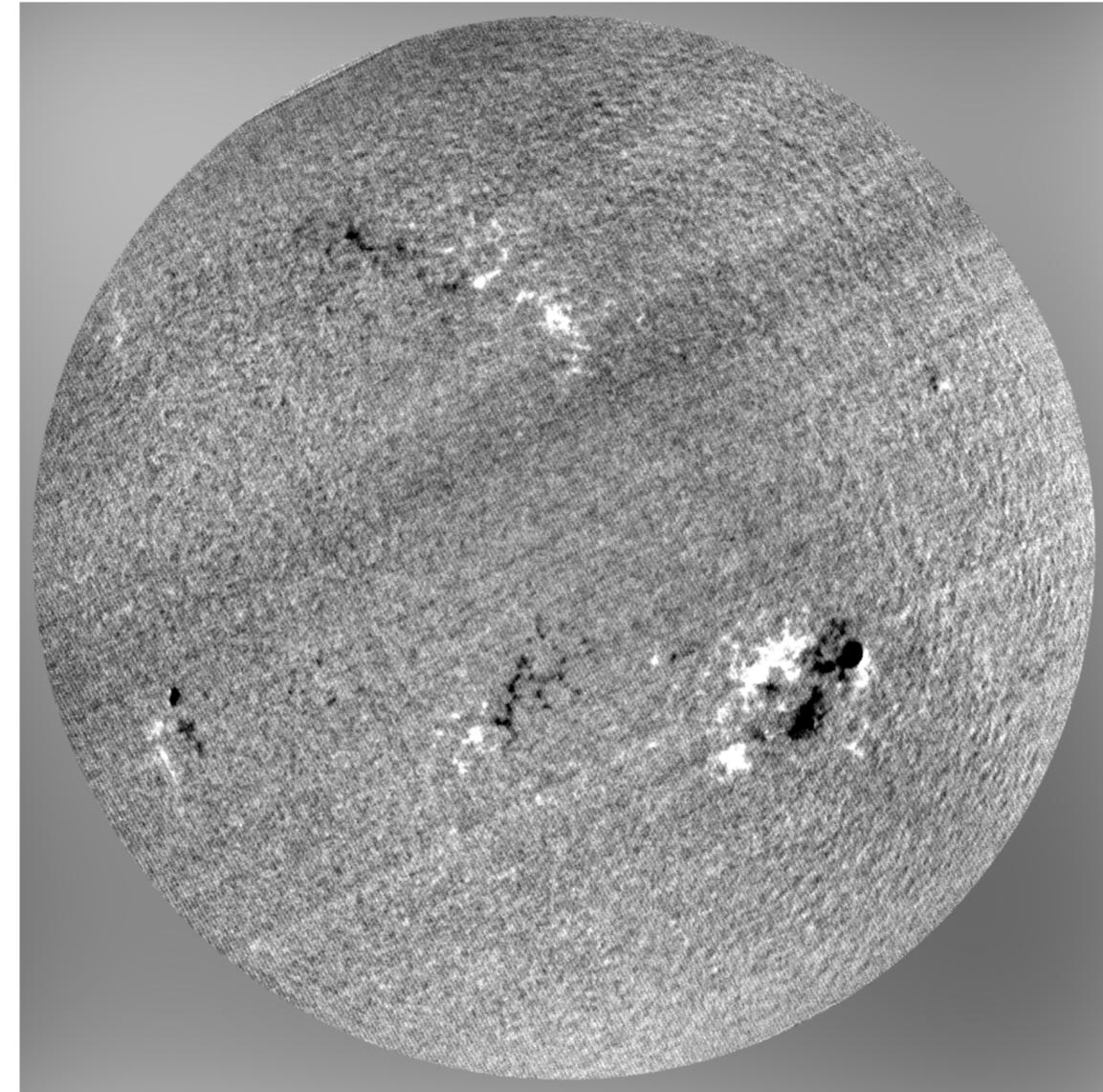
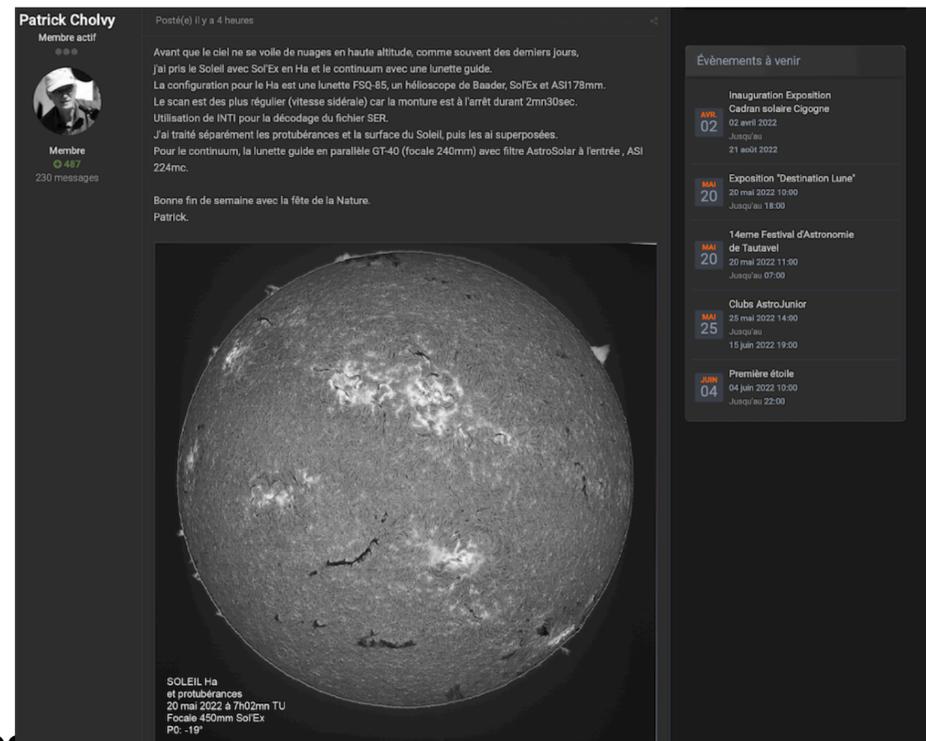
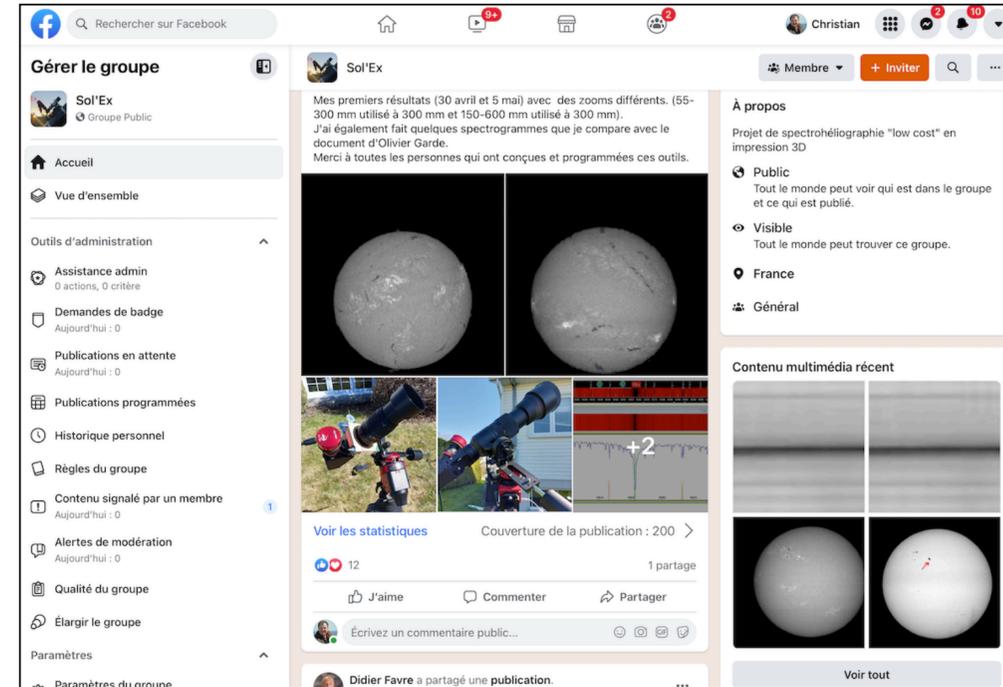
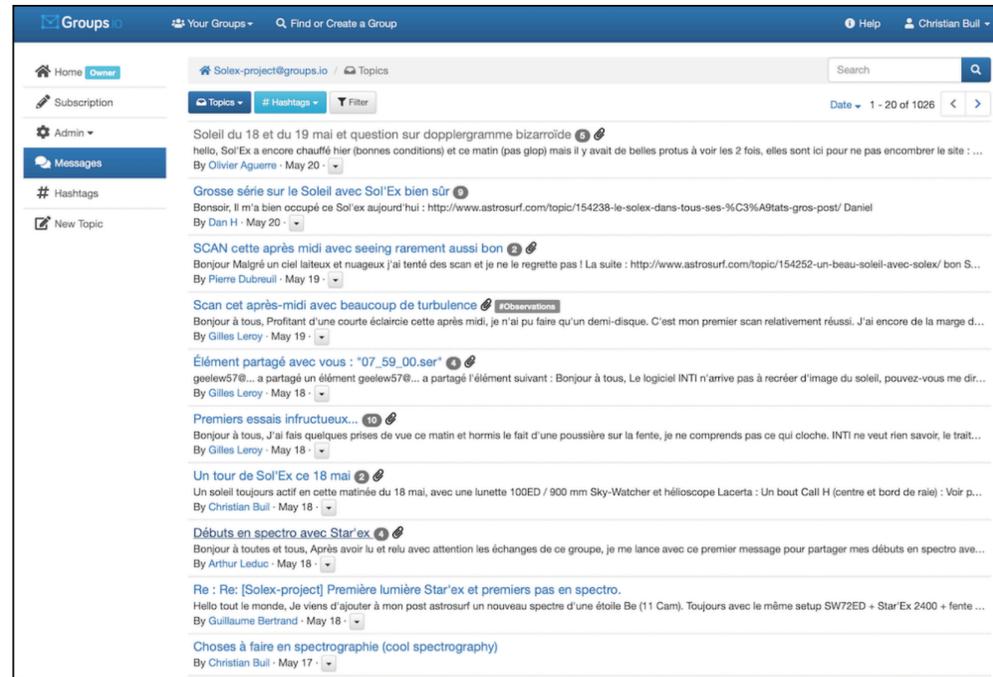


Image Sol'Ex pour la même date

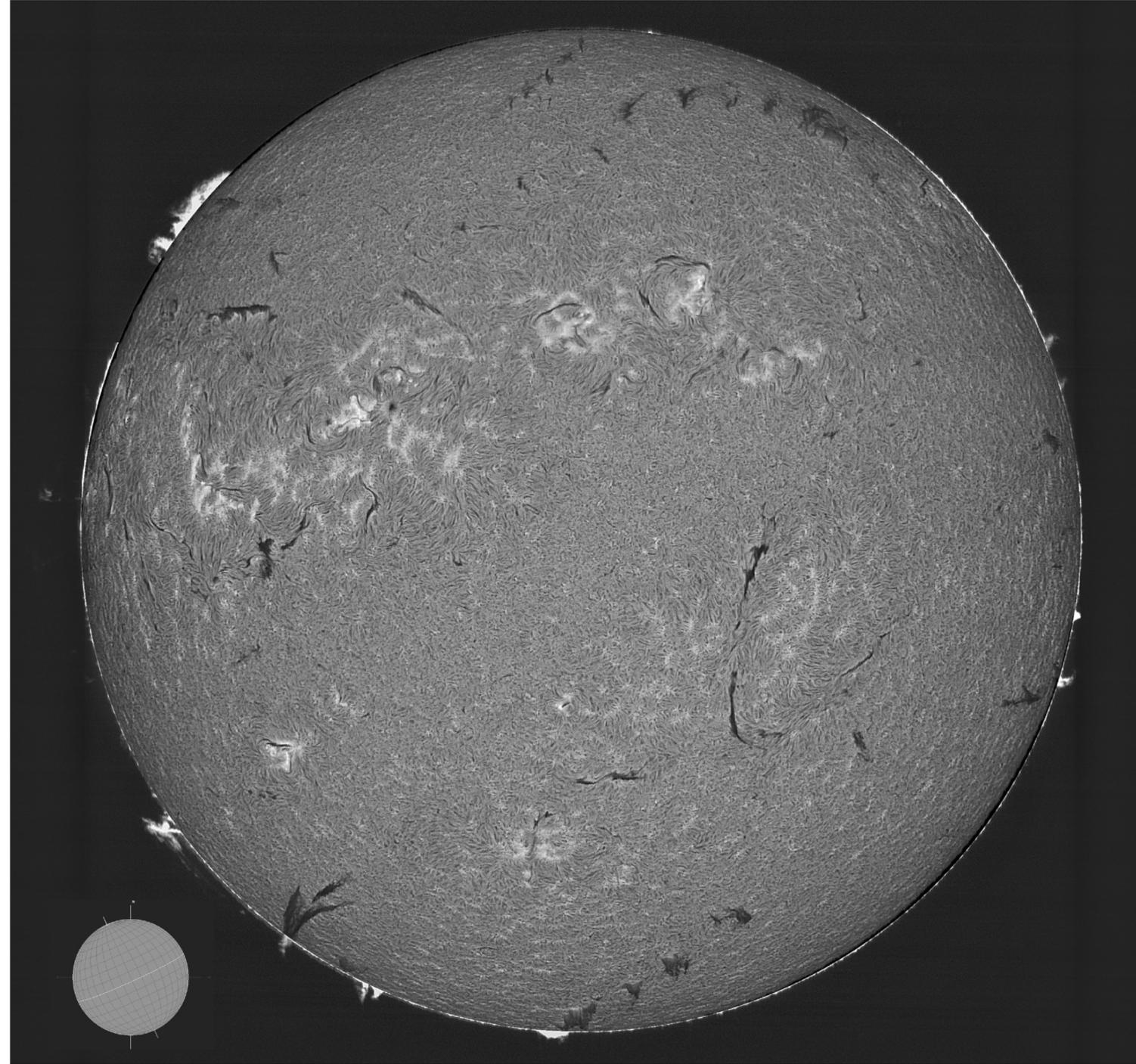
Sol'Ex : une aventure largement partagée

(plus de 300 exemplaires diffusés en un an et raisonnement internationale)

Projets de base de données, d'un réseau d'alerte, d'un suivi 24h/24h, de collaborations pro-am...



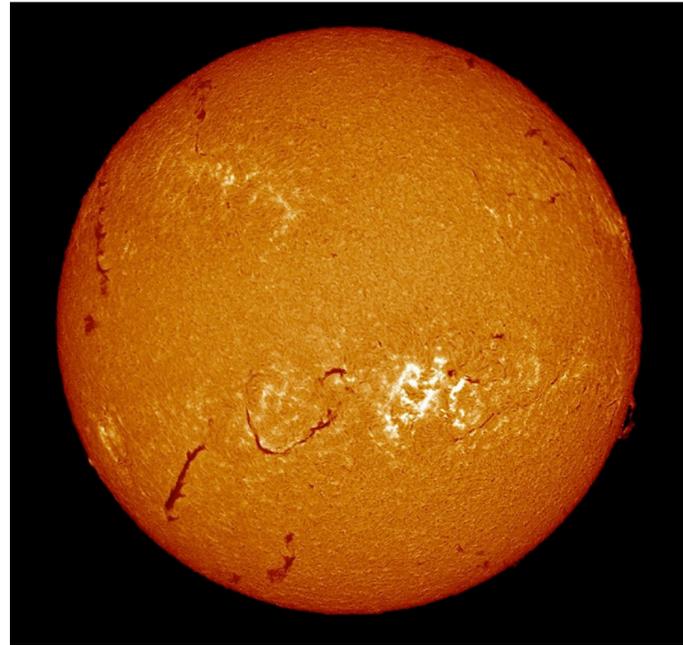
Des images spectaculaires



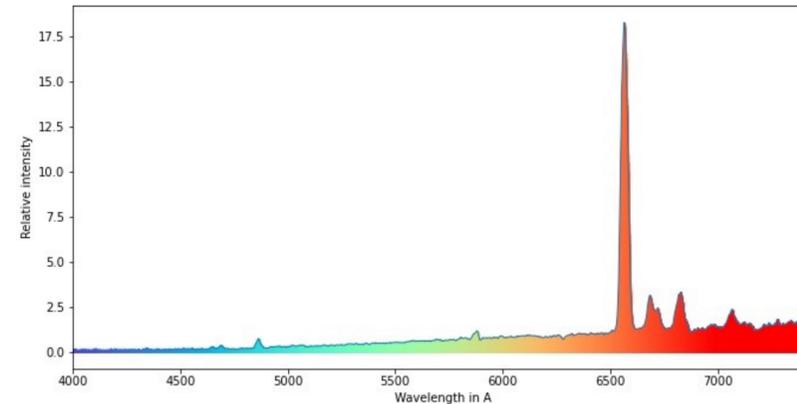
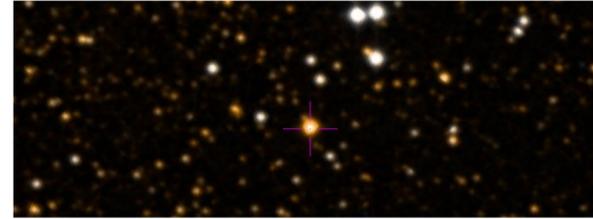
O.Daguerre - triplet 80x480, AZEQ5, caméra 290 mono, expo 4,2 ms, compositage sur 5 à 7 minutes et mosaïque de 2 panneaux.

Mais encore...

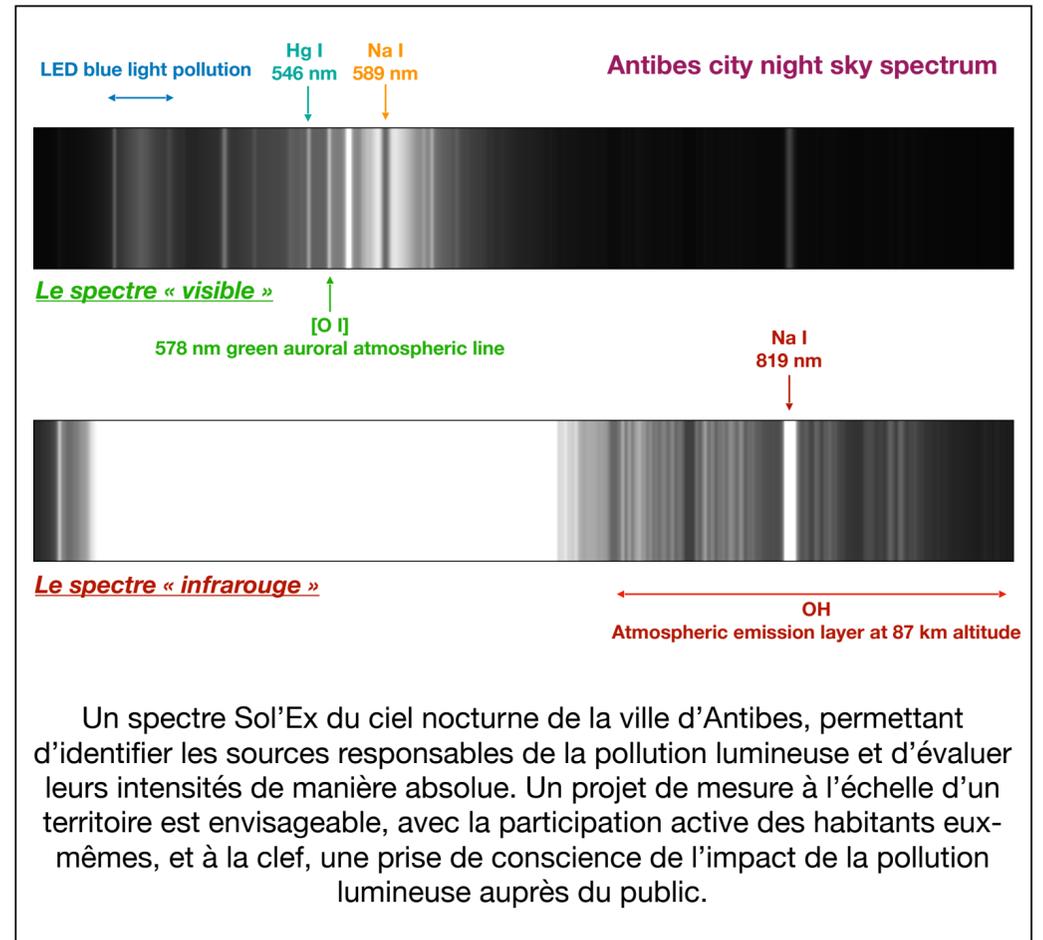
Sol'Ex peut être aisément convertie en un spectrographe astronomique très performant, souple, simple d'utilisation, et de faible coût, avec une foule d'applications possibles. C'est l'extension Star'Ex de Sol'Ex !



Une image du Soleil obtenue avec Sol'Ex associé une petite lunette astronomique dans la lumière de la raie rouge de l'hydrogène. D'autres raies peuvent être choisies, avec en plus la possibilité de mesurer la vitesse des protubérances et même la force du champ magnétique solaire !



A partir de la version « étoile » de Sol'Ex (configuration Star'Ex), une image du micro quasar SS433 réalisée avec un modeste télescope de 20 cm depuis son jardin, un objet astronomique qui abrite un trou noir responsable d'un jet de matière atteignant 25% de la vitesse de la lumière que l'on voit évoluer de jour en jour.



Pour en savoir plus sur le projet Sol'Ex / Star'Ex : <http://www.astrosurf.com/solex/>

Merci pour votre attention !



<https://www.youtube.com/watch?v=uPKokkNFz3o>

Premiers essais Sol'Ex

Observatoire des Makes

Denise - Catherine - Geneviève
Magali - Raymond - Elsa

0:01 / 1:14

Image H alpha (hydrogène) monochrome

Protubérances

Facules

0:15 / 1:14

<http://www.astrosurf.com/solex/>

